

**Somatosensorisch evozierte Potentiale
nach Dermatomreizung zur Objektivierung
sensibler radikulärer Ausfälle
bei lumbalen Bandscheibenvorfällen**

Dissertation

**zur Erlangung des akademischen Grades
doctor medicinae (Dr. med.)**

vorgelegt dem Rat der Medizinischen Fakultät der
Friedrich-Schiller-Universität Jena

von Ole Goßerau

geboren am 25.09.1970 in Schlema

Gutachter:

1. Prof. Dr. med. R. Kalff, Jena
2. Prof. Dr. med. R. A. Venbrocks, Eisenberg
3. PD Dr. med. habil. R. Malessa, Weimar

Tag der öffentlichen Verteidigung: 05. Februar 2002

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG UND FRAGESTELLUNG	2
2. HISTORISCHES UND TECHNISCHE GRUNDLAGEN.....	6
3. PATIENTEN UND GRUPPEN	8
4. METHODENBESCHREIBUNG	10
4.1. EINSCHLUßKRITERIEN.....	10
4.2. REIZ- UND ABLEITTECHNIK.....	10
4.3. DOKUMENTATION.....	13
4.4. AUSWERTUNG	14
4.4.1. Latenz- und Amplitudenvermessung.....	14
4.4.2. Statistische Auswertung.....	15
5. ERGEBNISSE.....	19
5.1. WELLENHÄUFIGKEITEN	19
5.2. NORMALWERTE VON LATENZEN UND AMPLITUDEN.....	20
5.3. INTERINDIVIDUELLER VERGLEICH.....	21
5.3.1. Latenzen.....	21
5.3.2. Amplituden.....	22
5.4. INTRAINDIVIDUELLER SEITENVERGLEICH.....	27
5.4.1. Latenzen.....	27
5.4.2. Amplituden.....	28
5.5. INTRAINDIVIDUELLER HÖHENVERGLEICH	33
5.5.1. Latenzen.....	33
5.5.2. Amplituden.....	34
6. DISKUSSION.....	35
6.1. DIE ROLLE DER DERMATOM-SEP IN DER PRAXIS	35
6.2. ZUR METHODE	37
6.2.1. Einschlußkriterien.....	37
6.2.2. Reiz und Ableittechnik	38
6.2.3. Andere Faktoren	40
6.2.4. Statistische Überlegungen	40
6.2.5. Referenzkriterien.....	41
6.3. ZU DEN ERGEBNISSEN	42
6.3.1. Interindividueller Vergleich.....	42
6.3.2. Intraindividueller Seitenvergleich	43
6.3.3. Intraindividueller Höhenvergleich	45
7. ZUSAMMENFASSUNG.....	46
8. LITERATURVERZEICHNIS.....	48

1. Einleitung und Fragestellung

Über den Einsatz somatosensorisch evozierter Potentiale nach Dermatomreizung (Dermatom-SEP) in der präoperativen Topodiagnostik von Wurzelreizsyndromen liegen bisher nur sehr widersprüchliche Ergebnisse vor. So zeigte Rodriguez et al. [45] in seiner Serie, daß Dermatom-SEP in der Diagnostik lumbosakraler Wurzelschäden gegenüber der Nadelelektromyographie die weniger sensitive Methode darstellen. Weiterhin beschrieb er auch falsch positive Befunde. Gleiches wurde von Aminoff et al. [1] bestätigt. Aminoff et al. [2] fand in 25 % der Fälle ein der Höhe der Wurzelläsion entsprechendes pathologisches Dermatom-SEP. Dvonch et al. [15] fand dagegen bei 87% pathologische SEP-Befunde und Katifi and Sedgwick [29] sahen in 84% der Fälle ein pathologisches Dermatom-SEP, wenn gleichzeitig objektivierbare neurologische Ausfälle vorlagen. Sitzoglou et al. [52] beschrieb eine klare Korrelation von Dermatom-SEP-Veränderungen und der entsprechenden Wurzelschädigung in bis zu 83,3% der untersuchten Fälle. Die elektromyographische Untersuchung derselben Patienten korrelierte in 62,5%. In der Literatur gibt es keine Übereinstimmung hinsichtlich der Kriterien, die ein Dermatom-SEP als pathologisch definieren [1, 2, 28, 29, 35, 58]. So werden z.B. Amplitudenunterschiede von 4:1 im intraindividuellen Seitenvergleich als Normalwerte beschrieben [28].

Im Rahmen der Dokumentationspflicht bei operativen Eingriffen besteht ein zunehmender Bedarf nach einer nichtinvasiven topodiagnostischen Untersuchungstechnik zur Objektivierung sensibler radikulärer Läsionen, die zur Ergänzung der subjektiven Angaben und der Klinik des Patienten eingesetzt werden kann. In der Praxis spielen die neurophysiologischen Untersuchungsmethoden gegenüber den radiologischen Methoden, wie der Computertomographie (CT) und der Magnetresonanztomographie (MRT), eine ergänzende Rolle. In vielen Fällen ist der zusätzliche Einsatz elektrophysiologischer Untersuchungsverfahren durchaus dienlich. Beispiele hierfür sind radiologisch nachgewiesene Nervenwurzelläsionen in mehreren Etagen sowie Diskrepanzen zwischen radiologischem Befund und der Klinik des Patienten [58].

Motorische Nervenschädigungen lassen sich mittels Elektromyographie (EMG) nachweisen, wobei die Läsionen allerdings erst mit einer Verzögerung von ca. 3 Wochen im EMG darstellbar sind. Die Sensitivität dieser Untersuchung wird in der Literatur unterschiedlich bewertet [21, 25, 30, 32, 33, 50, 61]. Durch die EMG-Untersuchung kann eine Aussage über die Funktion der motorischen Komponente der radikulären Funktion getroffen werden. Viele Patienten mit lumbosakraler Radikulopathie zeigen aber neben ausgeprägten Schmerzen ausschließlich sensible Ausfälle [20].

Die Größe der bisher elektrophysiologisch mit Dermatom-SEP untersuchten Patientengruppen beläuft sich in der Literatur auf 15 bis 94 Fälle [1, 28, 35, 56]. In einem Fall [55] wurden 155 Patienten untersucht, lediglich 58 erfüllten jedoch die Einschlusskriterien für die Studie. Zur Objektivierung der SEP-Befunde wurden unterschiedliche Verfahren mit oft widersprüchlichen Ergebnissen genutzt [2, 30, 32, 46, 52]. So dienten z.B. intraoperativ erhobene Befunde [56], radiologische Untersuchungstechniken wie Myelographie [2, 18, 45, 52], CT [45, 52, 55, 58] oder MRT [1, 52, 55], elektrophysiologische Untersuchungstechniken wie EMG [15, 22, 45, 58], NLG [22] oder F-Welle [22, 58] als Referenzkriterium für das Vorliegen einer Nervenwurzelläsion. Zusätzlich wird oft die Klinik der Patienten berücksichtigt [1, 29, 38, 52]. Entsprechend verschieden sind die Ergebnisse der Studien. Innerhalb desselben Patientenkollektivs werden unterschiedliche Referenzkriterien zur Objektivierung der Nervenwurzelläsionen herangezogen. Bei der oben erwähnten Gruppe mit 94 Patienten wurden die Befunde in 52 Fällen intraoperativ und in 42 Fällen radiologisch gesichert [56].

In unserer Studie wurden die nach Dermatomreizung abgeleiteten somatosensorisch evozierten Potentiale eines Kollektivs von 115 Patienten mit sensiblen lumbalen Nervenwurzelreizsyndromen bei zugrundeliegenden Bandscheibenvorfällen ausgewertet. Die Patienten wurden alle in der Neurochirurgischen Klinik der FSU Jena präoperativ elektrophysiologisch untersucht und anschließend konnten bei allen Patienten intraoperativ eine oder mehrere Wurzelkompressionen dokumentiert werden. Das Referenzkriterium ist also in allen 115 Fällen dasselbe, nämlich der intraoperativ vom Operateur erhobene Befund der Wurzelkompression bzw. des Fehlens derselben. Bei allen untersuchten Patienten lag eine radikuläre Beschwerdesymptomatik vor.

Es soll eine Aussage über die Wertigkeit des Einsatzes von Dermatom-SEP in der präoperativen Topodiagnostik bei Patienten mit intraoperativ bestätigten relevanten Kompressionen der Nervenwurzeln L4, L5 und S1 getroffen werden. Die im Operationsprotokoll beschriebenen Befunde stellen ein objektives Referenzkriterium zu den klinischen Befunden der Patienten dar. Mittels Reizung eines definierten Dermatoms, welches dem sensiblen Innervationsgebiet einer lumbalen bzw. sakralen Nervenwurzel derselben Seite entspricht und simultaner Ableitung der evozierten Potentiale vom Scalp des Patienten sollen die durch Kompression geschädigte Nervenwurzeln erkannt werden.

In dieser Arbeit werden die Ergebnisse einer quantitativen Auswertung von präoperativen Dermatom-SEP in einem Kollektiv von 115 Patienten mit sensiblen radikulären Läsionen bei lumbalen Bandscheibenvorfällen vorgelegt.

Fragestellung:

1. Besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen der betroffenen Nervenwurzel und dem entsprechenden SEP-Befund?
2. Wie aussagefähig ist die Methode zur diagnostischen Eingrenzung von Höhen- und Seitenlokalisation der radikulären Schädigung?
3. Welche Welle ist dabei für die Befunderhebung signifikant (Sensitivität, Spezifität)?
4. Welcher Vergleich der SEP-Wellen ist am aussagekräftigsten (intra- oder interindividueller Vergleich)?
5. Sind die Latenzen oder die Amplituden besser für die Auswertung geeignet?

2. Historisches und technische Grundlagen

Im Jahre 1947 berichtete Dawson [11] in seiner grundlegenden Publikation über die Möglichkeit, nach Stimulation eines Armnervs beim Menschen Potentiale von der Kopfhaut über dem sensiblen Kortex abzuleiten. Als weiterer Meilenstein in der Entwicklung der gesamten Elektrophysiologie kann die etwa zeitgleich beginnende Entwicklung des Computers gesehen werden. Seit Ende der 70er Jahre ist eine Fülle von Publikationen zu diesem Thema erschienen, die entweder die normale Physiologie von SEP und deren anatomisches Korrelat oder Befunde bei verschiedenen pathologischen Prozessen beschreiben [10, 60].

Durch die Einführung der digitalen Datenverarbeitung war nun die Möglichkeit des Averagings gegeben. Das vom Kortex abgeleitete Potential ist zunächst von verschiedenen Störfaktoren (Rauschen) überlagert. Bei den evozierten Potentialen besteht das Signal aus der durch einen Reiz angestoßenen Reaktion. Rauschen ist die Gesamtheit der übrigen Aktivität, nämlich Ruhe-EEG und elektrische Artefakte. Das Averagingverfahren dient der Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses. Nach erfolgter Analog-Digitalumwandlung des Signals wird dessen Amplitude in vorgegebenen Zeitabständen (Abtastfrequenz) und in vorgegebenen Stufen ermittelt. Dabei kann zwei im Analogsignal nur wenig verschiedenen Amplituden im digitalen Signal exakt derselbe Wert zugeordnet werden [42]. Die Abtastfrequenz muß hierbei einem Vielfachen der raschesten Signalfrequenz entsprechen. Das Averaging erfolgt durch einfache Addition, wobei das Ergebnis durch die Zahl der Mittelungsschritte geteilt wird. Wenn man annimmt, daß Form und Amplitude des Signals konstant sind und zugrundelegt, daß diese Tatsache für das Rauschen nicht zutrifft, so wird verständlich, daß sich bei konstantem Signal-Wert der Wert für das Rauschen in Richtung der Zahl 0 mittelt. [36]. Die Zahl der Mittelungsschritte steigt dabei um das Quadrat des Verbesserungsfaktors [43] und variiert somit in Abhängigkeit von der Qualität des Ausgangssignals. Abhängig von der jeweiligen Filtereinstellung können nun noch bestimmte Wellenkomponenten hervorgehoben oder unterdrückt werden (Hochpaß, Tiefpaß). Besser und Hopf [5] beschrieben den Einfluß der Filter auf Amplituden und Latenzen der Potentialkomponenten.

Die heute verwendeten Geräte besitzen meist alle eine automatische Artefaktunterdrückung und sind damit in der Lage, grobe Störsignale wie Muskelartefakte etc. von vornherein vom eigentlichen Signal zu differenzieren und zu eliminieren. Trotzdem können Artefakte nicht vollständig ausgeschlossen werden (Geräteartefakte, fehlerhafte Erdung, Kabelbrüche, Wackelkontakte, zu hoher Übergangswiderstand bei schlechtem Elektroden-sitz). Die besondere Aufmerksamkeit des Untersuchers ist deshalb stets gefordert.

SEP-Studien entwickelten sich zu einer beliebten Methode, die sensorische Funktion peripherer Nerven und ihrer spinalen Wurzeln bei Patienten mit lumbalen Nervenwurzelläsionen zu untersuchen und verschiedene Studien berichten über eher begrenzte Erfolge [7, 19, 26, 57, 62].

Die Untersuchung peripherer gemischter Nerven ist für die Funktionsdiagnostik einzelner spinaler Nervenwurzeln nicht geeignet, da es aufgrund der multisegmentalen Innervation zur Maskierung pathologischer Ableitungen durch eine nichtgeschädigte Wurzel kann. Dermatom-SEP wurde entwickelt, um diese Lücke zu füllen [52].

3. Patienten und Gruppen

Bei 115 Patienten wurden von insgesamt 498 Nervenwurzeln der Höhen L4, L5, und S1 präoperativ Dermatom-SEP abgeleitet. Das Patientenkollektiv setzte sich aus 39 weiblichen und 76 männlichen Personen im Alter von 19 bis 79 Jahren zusammen. Das Durchschnittsalter betrug 43,9 Jahre bei einer Standardabweichung von 11,81 [Abb.1].

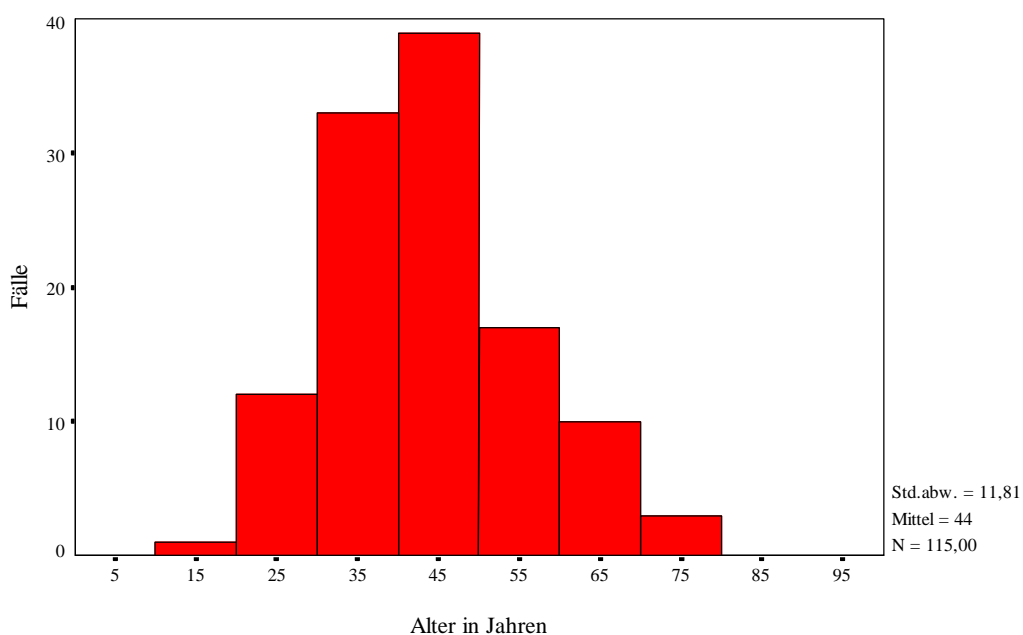


Abb. 1: Altersverteilung des untersuchten Patientenkollektivs.

Bei 80 der untersuchten Patienten konnten einfache Nervenwurzelläsionen, d.h. bei demselben Patienten war lediglich eine Nervenwurzel einer Höhe und einer Seite betroffen, dokumentiert werden. In 35 Fällen lagen Mehrfachläsionen vor. Bei 3 der Patienten mit Mehrfachläsionen waren rechte und linke Seite derselben Höhenlokalisation betroffen und bei 28 Patienten waren 2 Segmente derselben Seite geschädigt. In 2 Fällen waren 2 Höhen jeweils rechts und links betroffen. In 2 weiteren lagen in 3 Bandscheibenetagen Wurzelschäden vor, wobei 2 Höhen davon beidseits geschädigt waren.

Die innerhalb des Patientenkollektivs elektrophysiologisch untersuchten Nervenwurzeln wurden in 2 Gruppen eingeteilt [Abb. 2]. Die Gruppe 1 beinhaltet

alle Nervenwurzeln, die sich intraoperativ als komprimierte Wurzeln darstellten, also alle pathologischen Nervenwurzeln. Die unauffälligen, d.h. nicht komprimierten Wurzeln wurden der Gruppe 2 (Vergleichsgruppe) zugeordnet. Diese lagen entweder kontralateral zur komprimierten Nervenwurzel in derselben Höhenlokalisation oder ipsi- bzw. kontralateral in einer anderen Etage.

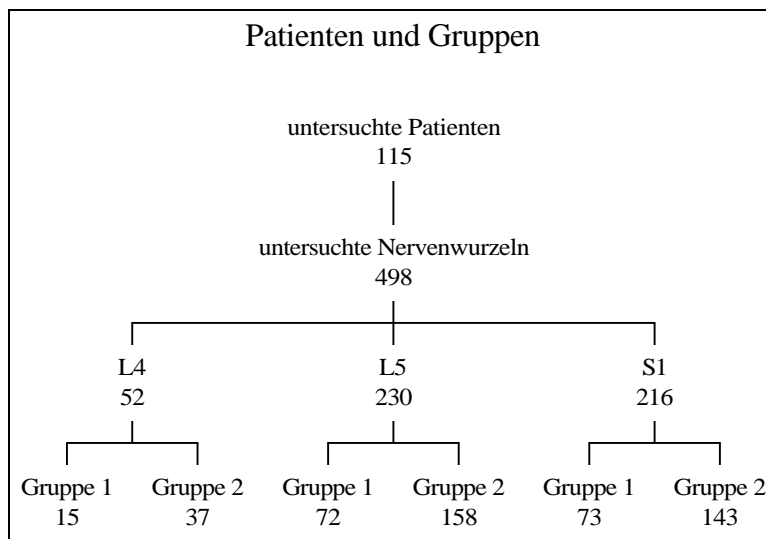


Abb. 2: Gruppeneinteilung der untersuchten Nervenwurzeln.

Insgesamt wurden 160 pathologische (Gruppe 1) und 338 unauffällige (Gruppe 2) Nervenwurzeln elektrophysiologisch mittels Dermatom-SEP untersucht.

Von den SEP-Ableitungen waren 11 aufgrund eines zu hohen Rauschniveaus nicht eindeutig zuordenbarer Wellenkomponenten nicht vermessbar. 4 weitere Ableitungen waren durch technische Artefakte bedingt nicht verwertbar.

In 12 Fällen war ein totaler Potentialausfall (Potential unterhalb der Nachweisgrenze von 0,5 µV) aller untersuchten Wellenkomponenten (N1, P1, N2, P2, N3) zu verzeichnen. Von den unauffälligen Nervenwurzeln liegen 141 in der Höhe des Bandscheibenvorfalls auf der kontralateralen Seite. 197 der gesunden Nervenwurzeln liegen in einer nicht betroffenen Höhe.

4. Methodenbeschreibung

4.1. Einschlußkriterien

Folgende Einschlußkriterien wurden für die Studie festgelegt:

1. Vorhandenes klinisch verifizierbares radikuläres Beschwerdebild des Patienten (lumboischialgiforme Beschwerdesymptomatik, sensible oder motorische Ausfälle, wobei mindestens eines der Symptome vorhanden sein muß)
2. Bilaterale elektrophysiologische Untersuchung mittels Dermatome-SEP von mindestens 2 Höhen im Bereich der Nervenwurzeln L4, L5 und S1
3. Intraoperativ nachgewiesene Kompression mindestens einer Nervenwurzel

4.2. Reiz- und Ableittechnik

Alle Messungen wurden mit dem Nikolet VIKING 2 durchgeführt. Das Gerät verfügt über 2 Pufferspeicher und ist somit in der Lage, die Reizantworten der geraden und der ungeraden Stimuli getrennt zu mitteln. Stimuliert wurde über die von Nikolet standardmäßig mitgelieferte bipolare Oberflächenelektrode. Die Anode befand sich dabei immer distal der Kathode. Es wurde mit Einzelimpulsen von 0,2 s Dauer und einer Frequenz von 4,1 - 5,3 Hz gereizt. Die Reizintensität wurde vom Patienten selbst festgelegt, wobei der Reiz deutlich spürbar sein, jedoch unterhalb der Schmerzgrenze liegen sollte, und erreichte Werte von 10 bis 25 mA. In einem Fall wurde mit 28,2 mA, in einem zweiten mit 35,3 mA gereizt. Das rechte und linke Dermatom einer Höhe wurde beim selben Patienten stets mit identischer Reizintensität stimuliert. Die Stimulationsorte wurden so ausgewählt, daß das Risiko von Dermatomeüberlappungen möglichst gering gehalten wurde. Abb. 3 - 5 geben einen Überblick über die verwendeten Elektrodenpositionen zur Stimulation der Dermatome L4, L5 und S1. Der Untersuchungsraum war normal beleuchtet und akustisch nicht besonders abgeschirmt. Die Patienten saßen während der Untersuchung in wachem Zustand mit geöffneten Augen in einem bequemen, in Lehne und Fußauflage frei verstellbaren EEG-Stuhl und wurden dazu angehalten sich so gut wie möglich zu entspannen.

Abgeleitet wurde vom Scalp unter Verwendung handelsüblicher Nadelelektroden. Die Elektroden wurden entsprechend des international gültigen 10/20-EEG-Systems an Fpz (Stirn), Cz` (Medianlinie 6 cm occipital der Kranznaht) und T₄ (temporal rechts) positioniert [Abb.6]. Die Potentiale wurden ausschließlich bipolar zwischen Fpz und Cz` abgegriffen und über einen Differenzverstärker verstärkt [41]. T₄ fungierte als Erdungselektrode. Cz` wurde mit einer Distanz von 19 cm zur Nasenwurzel standardisiert. Um ein für die Auswertung günstiges Signal-Rausch-Verhältnis zu gewährleisten, wurden die erhaltenen Signale vom Averager zwischen 309 und 1000 Mittelungen unterzogen und solange analog gefiltert, bis ein Rauschniveau unterhalb 0,5 μ V erreicht war.



Abb. 3: Position der Reizelektrode zur Stimulation von L4



Abb. 4: Position der Reizelektrode zur Stimulation von L5



Abb. 5: Position der Reizelektrode zur Stimulation von S1



Abb. 6: Positionen der Ableitelektroden.

4.3. Dokumentation

Alle SEP-Ableitungen wurden unmittelbar nach der Untersuchung mittels Laserdrucker auf A4-Papier ausgedruckt und in Ordnern unter fortlaufender Nummerierung archiviert. Die Untersuchungsprotokolle beinhalten unter anderem folgende Daten:

- Untersuchungsnummer, Name des Patienten
- Zeitpunkt der Untersuchung
- untersuchte Dermatome
- Stimulationsparameter (Reizfrequenz [Hz], Reizintensität [mA], Impulsdauer Impulsart, Anzahl der Mittelungen)

Die Reproduzierbarkeit der Potentiale wurde für alle Ableitungen dokumentiert.

Von den Operationsprotokollen wurde eine Kopie angefertigt.

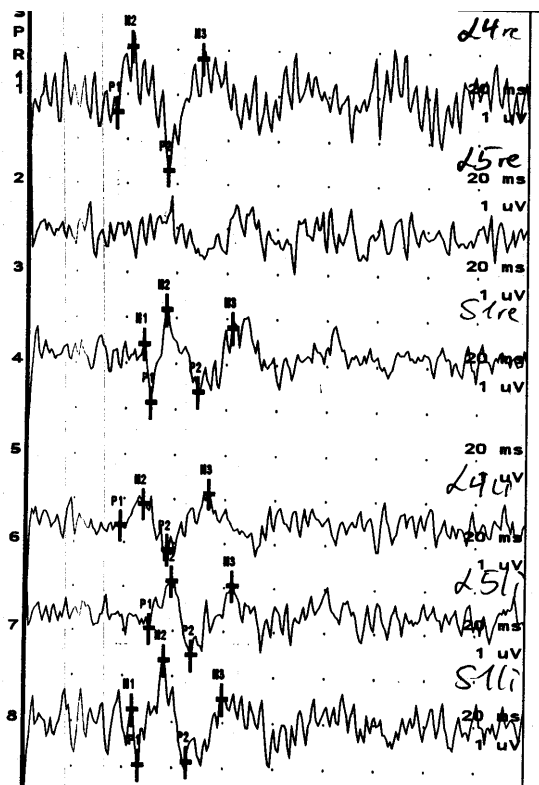


Abb. 7: typische Darstellung der Dermatome-SEP-Ableitungen von L4, L5 und S1 beidseits. L5 rechts ist nicht sicher reproduzierbar.

4.4. Auswertung

4.4.1. Latenz- und Amplitudenvermessung

Die Latenzen der Gipfel von N1, P1, N2, P2 und N3 sowie die Amplituden der Wellen N1P1, P1N2 und N2P2 wurden mittels einer Rasterschablone [Abb.8], die als Folie über die Kurven [Abb.7] gelegt wurde, vermessen. Alle Amplituden wurden als Gipfel-Gipfel-Differenz angegeben. Dadurch stieg die Meßgenauigkeit nicht unerheblich, da die Nulllinie meist nicht exakt festlegbar ist [36]. Die Schablone war sehr präzise über die auf dem Ausdruck der SEP-Ableitungen bereits vorhandenen Rasterpunkte positionierbar, wodurch eine hohe Meßgenauigkeit mit einer Abweichung von maximal 0,1 μV bzw. 2 ms erreicht wurde. Die verwendete Einteilung entsprach der in der Meßreihe am häufigsten vorkommenden Darstellungsqualität von 20 ms (horizontal) und 1 μV (vertikal) pro Feld. Bei Darstellungen von 10 ms sowie 0,5 oder 2 μV pro Feld wurde entsprechend umgerechnet.

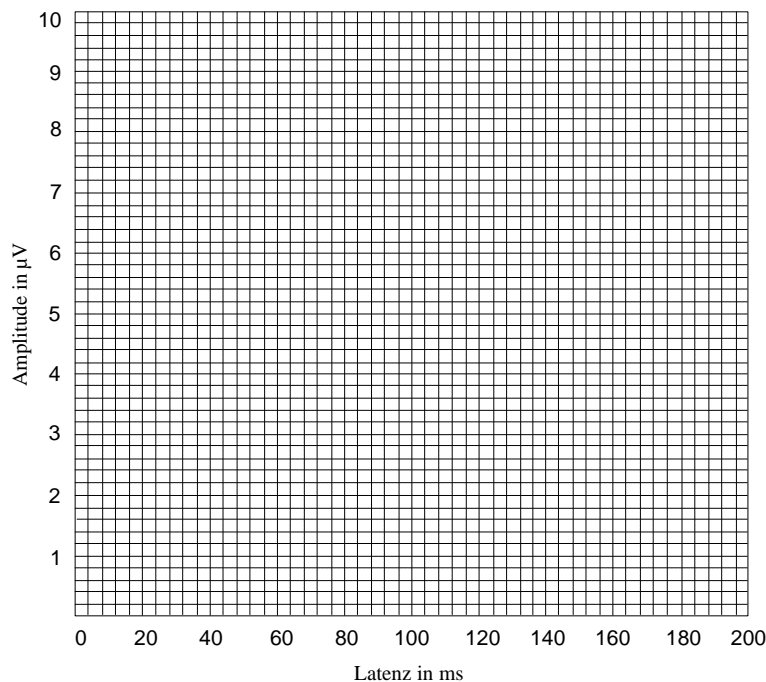


Abb. 8: Klarsichtfolie mit Meßraster. Die Folie läßt sich exakt auf die vorgegebenen Punkte positionieren.

Bei einem Teil der Kurven erfolgte die Vermessung bereits am Bildschirm. Grundlage dafür bildete das softwareinterne Meßraster, bei dem ein vertikaler Balken per Trackball auf die entsprechende Wellenkomponente platziert werden mußte. Die gewünschten Peaks wurden so mit einem Kreuz markiert [Abb.7], die Latenz- und Amplitudenvermessung erfolgt automatisch und erschien als Tabelle auf dem Ausdruck. Alle bei diesen Kurven mit der Folie durchgeführten Kontrollmessungen ergaben eine exakte Übereinstimmung der Werte (Meßgenauigkeit beider Methoden $\leq 0,1 \mu\text{V}$ bzw. 2 ms), so daß ein aus den beiden unterschiedlichen Meßverfahren resultierender Meßfehler ausgeschlossen werden kann.

4.4.2. Statistische Auswertung

Die gesamten Meßwerte wurden primär mit dem Datenbank- und Tabellenkalkulationsprogramm Exel erfaßt. Sämtliche erforderlichen Differenzberechnungen wurden ebenfalls mit Excel durchgeführt. Die errechneten Werte konnten anschließend in das Statistikprogramm SPSS übernommen und dort weiterverarbeitet werden. Die Transparenz der Daten blieb dabei vollständig erhalten. Alle statistischen Berechnungen und Histogramme basieren auf dem Programm SPSS.

Die Werte wurden unter 3 Gesichtspunkten (3 Vergleiche) statistisch bearbeitet.

- Interindividueller Vergleich:

Im interindividuellen Vergleich wurden Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte sowie Standardabweichungen der Amplituden und Latenzen der einzelnen Wellen für die Gruppe der pathologischen Nervenwurzeln (Gruppe 1) und für die als gesund angenommene Vergleichsgruppe (Gruppe 2) ermittelt. Anschließend wurde geprüft, ob statistisch signifikante Lageunterschiede zwischen den beiden Gruppen bestehen. Das Untersuchungsobjekt in diesem Vergleich ist nicht der Patient, sondern jede einzelne untersuchte Nervenwurzel selbst. Um eine klare statistische Auswertung zu gewährleisten, wurden alle Dermatome-SEP, bei denen sowohl die

rechte als auch die linke Seite der Gruppe 1 zugeordnet waren, aus der statistischen Berechnung ausgeschlossen. Ebenfalls wurden alle SEP, die nicht sicher reproduzierbar oder unterhalb der Nachweisgrenze von 0,5 μV waren nicht mit ausgewertet. Komplette Potentialausfälle wurden mit in die Auswertung einbezogen wobei jeder Amplitude der Wert 0 zugeordnet wurde. Im Fall, daß sowohl rechte als auch linke Nervenwurzel derselben Höhe der Gruppe 2 angehörten, ging nur eine Seite, welche zufällig ausgewählt wurde, in die Statistik ein. Zur Auswahl wurden Zufallszahlen genutzt. Insgesamt konnten die SEP von 361 Nervenwurzeln ausgewertet werden (138 Gruppe 1, 223 Gruppe 2), wobei für jede untersuchte Höhe (L4, L5, S1) eine eigene Auswertung erfolgte. So konnte gewährleistet werden, daß jeder Patient der Statistik garantiert nur ein Dermatom der Gruppe 1 und 1 Dermatom der Gruppe 2 zusteuerte. Damit blieb die Gleichheit der Untersuchungsobjekte sicher gewährleistet.

- Intraindividueller Seitenvergleich:

Im intraindividuellen Seitenvergleich wurden die Unterschiede der Latenzen zwischen den Gruppen 1 und 2 sowie innerhalb der Gruppe 2 als Differenz der Absolutwerte, die der Amplituden als Differenz der Prozentwerte ermittelt. In Absprache mit dem Institut für Medizinische Statistik und Informatik wurde der jeweils größere Wert mit 100% bewertet. Die errechneten Differenzen der Absolut- bzw. Prozentwerte sind als Betrag ohne Vorzeichen zu werten und zeigen lediglich, ob signifikante Unterschiede zwischen beiden Gruppen existieren.

Der statistischen Auswertung lagen hier die Dermatom-SEP von 459 Nervenwurzeln L4, L5 und S1 zugrunde. Für jede untersuchte Höhe erfolgte eine eigene Auswertung. Innerhalb der beiden Gruppen wurden Paare aus den SEP von jeweils rechter und linker Nervenwurzel der entsprechenden Höhe gebildet, die dann miteinander verglichen wurden. Jeder Nervenwurzel der Gruppe 1 wurde die kontralaterale gesunde Wurzel (Gruppe 2) derselben Höhe zugeordnet. Diese Paarung bildete die Grundlage des Intraindividuellen Seitenvergleichs für die Gruppe 1. Innerhalb der Gruppe 2 wurden jeweils rechtes und linkes Dermatom-SEP derselben Höhe miteinander verglichen.

- Intraindividueller Höhenvergleich:

Die Dermatom-SEP von insgesamt 268 Nervenwurzeln der Höhen L5 und S1 wurden statistisch ausgewertet. Die SEP der Höhe L4 wurden aufgrund der geringen Fallzahlen nicht mit berücksichtigt. Sowohl die Amplituden als auch die Latenzen der SEP-Ableitungen unterschiedlicher Höhen weisen im Mittel physiologische Unterschiede auf, die für den direkten Vergleich interpoliert werden mußten. Dazu wurden die Werte um die Differenz (S1-L5) der im interindividuellen Vergleich für Gruppe 2 errechneten Mittelwerte korrigiert. Für jede untersuchte Höhe erfolgte eine eigene Auswertung. Es wurde standardisierte Vergleichsgruppen festgelegt. Jedes SEP der pathologischen Nervenwurzeln L5 (Gruppe 1) wurde mit dem entsprechenden SEP der ipsilateral benachbarten Wurzel S1 verglichen. Für die Höhe S1 der Gruppe 1 diente dann das SEP der Wurzel L5 derselben Seite als Vergleichskriterium. Die SEP der beiden kontralateral gelegenen gesunden Nervenwurzeln L5 und S1 wurden innerhalb der Gruppe 2 miteinander verglichen.

Die Unterschiede der Latenzen zwischen den Gruppen 1 und 2 und innerhalb der Gruppe 2 wurden als Differenz der Absolutwerte ermittelt. Die errechneten Differenzen sind, wie bereits im Seitenvergleich beschrieben, ohne Vorzeichen zu werten. Die intraindividuellen Unterschiede der Amplituden zwischen den SEP-Ableitungen der ipsilateralen Nervenwurzeln L5 und S1 wurden wie im Seitenvergleich als Differenz der Prozentwerte verglichen.

Zur statistischen Prüfung, ob zwischen den beiden Gruppen signifikante Lageunterschiede existieren, wurde für alle 3 Vergleiche der U-Test nach Mann und Whitney [23] verwendet. Der U-Test ist ein nichtparametrisches bzw. verteilungsfreies Testverfahren. Da die Normalverteilung der in den 3 Vergleichen ermittelten Werte in keinem Fall garantiert ist, erscheint dieser statistische Test am geeignetsten. Wie üblich wurde eine Irrtumswahrscheinlichkeit (α) von 0,05 angenommen.

Die Anzahl der Fälle, welche für die Auswertung vorlagen, ist sowohl für die 2 Gruppen als auch für die verschiedenen Wellenkomponenten innerhalb einer Gruppe unterschiedlich. Somit liegen den in den 3 Vergleichen ermittelten Werten unterschiedliche Fallzahlen zugrunde. Statistisch signifikante Werte wurden

hinsichtlich ihrer Sensitivität und Spezifität beurteilt und in Histogrammen mit der entsprechenden Verteilungskurve graphisch dargestellt, um die Verschiebung der Mittelwerte zwischen den beiden Gruppen sichtbar zu machen. Zur Darstellung des Verlaufs von Sensitivität und Spezifität wurden ROC-Kurven (Receiver-Operating-Kurve) verwendet, eine Darstellungsform, welche ursprünglich aus der Signalverarbeitung stammt, wo sie zur Einschätzung des Signal-Rausch-Abstandes dient [24].

5. Ergebnisse

Im Folgenden sind die Ergebnisse der 3 Vergleiche dargestellt. Aufgrund des umfangreichen Datenmaterials wurden alle ermittelten Werte in Tabellenform aufgearbeitet. Die statistische Auswertung erfolgte wie im Teil Methoden beschrieben. In allen 3 Vergleichen wurde zunächst unter Verwendung des U-Tests nach Mann und Whitney [23] geprüft, ob statistisch signifikante Lageunterschiede zwischen den beiden Gruppen existieren. Zur graphischen Darstellung signifikanter Unterschiede wurden Histogramme mit Verteilungskurven erstellt. Der Verlauf von Sensitivität und Spezifität wurde anhand von ROC-Kurven in Diagrammform anschaulich gemacht.

5.1. Wellenhäufigkeiten

Die Häufigkeit des Auftretens der einzelnen Wellen innerhalb der Gruppen 1 und 2 ist in Tabelle 1 ersichtlich. Bei der Betrachtung der Häufigkeiten, mit der sich die einzelnen Wellen innerhalb des Normalkollektivs (Gruppe 2) sicher reproduzieren und vermessbar darstellen, fällt auf, daß die Wellen P1, N2 und P2 mit der größten Konstanz auftreten (92% Welle P1 Höhe L5 bis 96% Wellen P1, N2, P2 Höhe L4). Somit sind auch die zugehörigen Amplituden P1N2 und N2P2 mit Reproduzierbarkeiten von 91% (P1N2 Höhe L5) bis 96% (P1N2 Höhe L4) am häufigsten. Die frühen Wellen N1 sind in 38% bis 54% (Höhe L5), die späten Wellen N3 in 75% (Höhe S1) bis 79% (Höhe L5) nachweisbar.

Gruppe	Derm.	Häufigkeit in %							
		N ₁	P ₁	N ₂	P ₂	N ₃	N ₁ P ₁	P ₁ N ₂	N ₂ P ₂
1	L4	40	87	87	80	60	40	87	80
	L5	32	83	87	88	67	32	83	85
	S1	39	94	94	92	69	39	92	92
2	L4	54	96	96	96	77	54	96	92
	L5	38	92	94	95	79	38	91	94
	S1	39	93	95	94	75	39	93	94

Tab. 1: Nachweisbarkeit der Latenzen N₁, P₁, N₂ und N₃ sowie der Amplituden N₁P₁, P₁N₂ und N₂P₂ innerhalb der Gruppen 1 und 2 in Prozent.

5.2. Normalwerte von Latenzen und Amplituden

Durch den Vergleich der Absolutwerte der Latenzen und Amplituden aller im untersuchten Patientenkollektiv abgeleiteten Dermatome-SEP konnten für beide Gruppen Mittelwerte und Standardabweichungen sowie Minimal- und Maximalwerte ermittelt werden [Tab.2]. Dabei gingen alle Amplituden (einschließlich Amplituden mit einem Betrag von 0,00 μV) in die Statistik ein. Die entsprechenden Latenzen konnten aufgrund der fehlenden Vermessbarkeit einer nicht reproduzierbaren Welle natürlich nicht ausgewertet werden.

Latenz / Amplitude	Höhe	Gruppe 1				Gruppe 2			
		MW	SA	Min.	Max.	MW	SA	Min.	Max.
N1 [ms]	L4	31,90	4,35	24,00	36,00	32,00	5,76	20,00	48,40
	L5	42,39	4,79	32,80	52,00	40,92	5,13	31,60	56,40
	S1	40,73	3,94	32,00	49,60	42,91	4,94	34,00	52,80
P1 [ms]	L4	41,68	7,56	34,00	63,00	39,38	5,38	30,00	57,60
	L5	48,01	4,52	37,00	58,00	47,58	4,21	36,40	63,00
	S1	48,57	4,03	40,00	58,00	48,07	4,27	38,00	59,60
N2 [ms]	L4	50,62	6,70	44,80	70,00	48,82	5,23	41,60	68,00
	L5	57,42	5,58	40,00	74,00	56,19	4,00	47,20	68,00
	S1	57,47	3,86	49,20	67,00	56,86	4,42	44,00	67,20
P2 [ms]	L4	61,53	9,17	54,00	88,00	60,32	6,25	52,40	84,00
	L5	67,74	6,52	47,00	82,00	67,66	4,76	56,80	83,00
	S1	68,99	5,55	59,00	90,00	68,98	5,51	50,00	85,00
N3 [ms]	L4	74,67	4,82	67,00	80,00	75,00	8,03	66,00	99,00
	L5	80,37	8,64	52,00	96,00	80,75	6,21	69,00	100,00
	S1	82,30	7,38	70,00	108,00	83,29	6,45	60,00	100,00
N1P1 [μV]	L4	0,22	0,30	0,31	0,80	0,61	1,02	0,05	4,20
	L5	0,21	0,46	0,05	2,60	0,30	0,49	0,05	2,40
	S1	0,45	0,84	0,10	4,00	0,35	0,60	0,16	4,00
P1N2 [μV]	L4	0,86	0,64	0,28	2,10	1,50	1,22	0,21	5,20
	L5	1,12	1,13	0,26	5,20	1,42	0,96	0,31	4,10
	S1	1,74	1,29	0,46	6,00	1,86	1,38	0,40	9,50
N2P2 [μV]	L4	0,92	0,74	0,28	2,30	1,61	1,25	0,38	5,60
	L5	1,26	1,14	0,40	4,60	1,61	0,97	0,45	4,70
	S1	1,81	1,40	0,40	7,20	2,19	1,63	0,40	10,00

Tab. 2: Mittelwerte und Standardabweichungen sowie Minimal- und Maximalwerte der Latenzen N1, P1, N2, P2 und N3 und der Amplituden N1P1, P1N2 und N2P2 der in beiden Gruppen abgeleiteten Dermatome-SEP von L4,L5 und S1.

5.3. Interindividueller Vergleich

5.3.1. Latenzen

Es wurden die Absolutwerte einander entsprechender Latenzen [ms] beider Gruppen verglichen. Im U-Test nach Mann und Whitney [23] ergaben sich keine signifikanten Latenzunterschiede zwischen Gruppe 1 und Gruppe 2. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 3-7 dargestellt. Mittelwertverschiebungen treten in beide Richtungen auf, d.h. der jeweils größere Mittelwert kann sowohl in Gruppe 1 als auch in Gruppe 2 liegen.

Latenzen [ms]

N1	Derm.	Gruppe 1			Gruppe 2			P
		MW	SA	n	MW	SA	n	
	L4	31,90	4,35	6	32,00	5,76	14	0,431
	L5	42,39	4,79	21	40,92	5,13	43	0,208
	S1	40,73	3,94	26	42,91	4,94	37	0,072

P1	Derm.	Gruppe 1			Gruppe 2			P
		MW	SA	n	MW	SA	n	
	L4	41,68	7,56	13	39,38	5,38	25	0,338
	L5	48,01	4,52	57	47,58	4,21	97	0,625
	S1	48,57	4,03	63	48,07	4,27	91	0,517

N2	Derm.	Gruppe 1			Gruppe 2			P
		MW	SA	n	MW	SA	n	
	L4	50,62	6,70	13	48,82	5,23	25	0,294
	L5	57,42	5,58	59	56,19	4,00	100	0,241
	S1	57,47	3,86	63	56,86	4,42	92	0,354

P2	Derm.	Gruppe 1			Gruppe 2			P
		MW	SA	n	MW	SA	n	
	L4	61,53	9,17	12	60,32	6,25	25	0,987
	L5	67,74	6,52	60	67,66	4,76	102	0,757
	S1	68,99	5,55	62	68,98	5,51	93	0,864

N3	Derm.	Gruppe 1			Gruppe 2			P
		MW	SA	n	MW	SA	n	
	L4	74,67	4,82	9	75,00	8,03	20	0,653
	L5	80,37	8,64	46	80,75	6,21	83	0,884
	S1	82,30	7,38	46	83,29	6,45	76	0,158

Tab. 3-7: Mittelwerte und Standardabweichungen der Latenzen N1, P1, N2, P2 und N3 sowie Signifikanz (P) der Lageunterschiede zwischen den Gruppen 1 und 2.

5.3.2. Amplituden

Die statistische Auswertung erfolgte in gleicher Weise wie bei den Latenzen unter Verwendung der Absolutwerte [μV]. Signifikante Lageunterschiede fanden sich innerhalb der Dermatom-SEP der Höhe L5 bei den Amplituden P1N2 ($P=0,004$) und N2P2 ($P=0,003$). Die Fallzahlen betrugen für die Amplituden P1N2 und N2P2 der Höhe L5 in Gruppe 1 $n=61$ und in Gruppe 2 $n=103$. Bei den Amplituden N1P1 konnten im U-Test keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Gruppen ermittelt werden. Die Amplituden der Dermatom-SEP von L4 und S1 ließen im U-Test ebenfalls keine Signifikanzen erkennen. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 8-10 dargestellt. Die Verteilungen der Amplituden P1N2 und N2P2 der Höhe L5 sind in den Histogrammen der Abb. 10+11 (P1N2) und Abb. 13+14 (N2P2) ersichtlich. Angaben zu Sensitivität und Spezifität lassen sich für die entsprechenden Trennwerte aus den Diagrammen [Abb. 9+12] entnehmen.

Amplituden [μV]

	Derm.	Gruppe 1			Gruppe 2			P
		MW	SA	n	MW	SA	n	
N1P1	L4	0,22	0,30	15	0,61	1,02	26	0,269
	L5	0,21	0,46	66	0,30	0,49	107	0,252
	S1	0,45	0,84	65	0,35	0,60	97	0,932

	Derm.	Gruppe 1			Gruppe 2			P
		MW	SA	n	MW	SA	n	
P1N2	L4	0,86	0,64	15	1,50	1,22	26	0,060
	L5	1,12	1,13	66	1,42	0,96	107	0,004
	S1	1,74	1,29	65	1,86	1,38	97	0,488

	Derm.	Gruppe 1			Gruppe 2			P
		MW	SA	n	MW	SA	n	
N2P2	L4	0,92	0,74	15	1,61	1,25	26	0,053
	L5	1,26	1,14	66	1,61	0,97	107	0,003
	S1	1,81	1,40	65	2,19	1,63	97	0,091

Tab. 8-10: Mittelwerte und Standardabweichungen der Amplituden N1P1, P1N2 und N2P2 sowie Signifikanz (P) der Lageunterschiede zwischen den Gruppen 1 und 2 ($P<0,05$ fettgedruckt).

Die beiden im interindividuellen Vergleich signifikanten Amplituden der Höhe L5 sind nachfolgend kurz beschrieben.

P1N2

Der Mittelwert der Amplitude P1N2 (L5) beträgt in der Gruppe 1 1,12 μV (SA=1,13), in Gruppe 2 1,42 μV (SA=0,96). Daraus resultiert eine Mittelwertdifferenz von 0,3 μV zwischen beiden Gruppen. Vergleicht man die Verteilungskurven (Häufigkeit, mit der die Amplitude in einem bestimmten Wertebereich auftritt) beider Gruppen, so fällt auf, daß der Gipfel der Kurve von Gruppe 1 um 0,3 μV nach links verschoben ist. In Gruppe 1 liegen 77 % der Amplituden im Bereich 0 - <1,5 μV . In Gruppe 2 ist die Streuung breiter, hier liegen nur 57 % der Amplituden in diesem Bereich. Die größte gemessene Amplitude P1N2 der Höhe L5 beträgt 5,2 μV in Gruppe 1 und 4,1 μV in Gruppe 2 [Tab.2]. Nimmt man eine Amplitude <0,5 μV als pathologisch an, liegt die Sensitivität der Untersuchungsmethode bei 32%, die Spezifität bei 85%. Bei Amplituden < 1 μV beträgt das Verhältnis Sensitivität/Spezifität 58/64 %, bei 1,5 μV als Grenzwert 77/44 % und bei 2 μV 80/24 % [Abb.9].

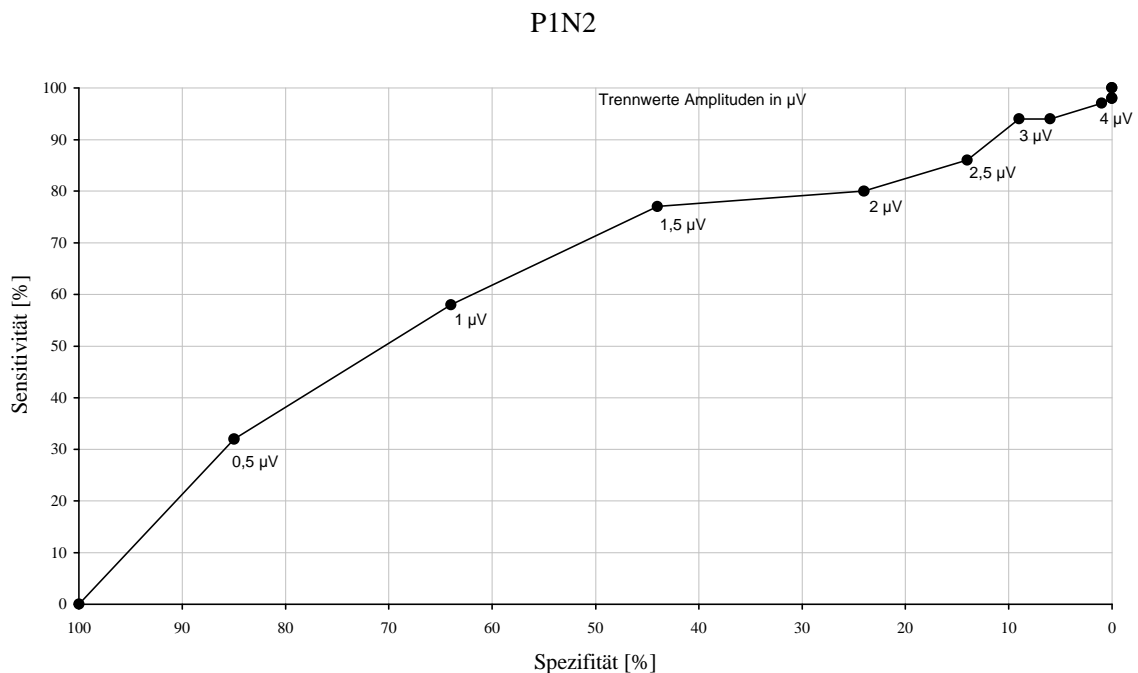


Abb. 9: Sensitivität und Spezifität der Amplituden P1N2 (Absolutwerte in μV) im interindividuellen Vergleich. Die Amplituden wurden in Gruppen zusammengefaßt. Der angegebene Trennwert stellt die Obergrenze des jeweiligen Bereichs dar, die in diesem nie erreicht wird.

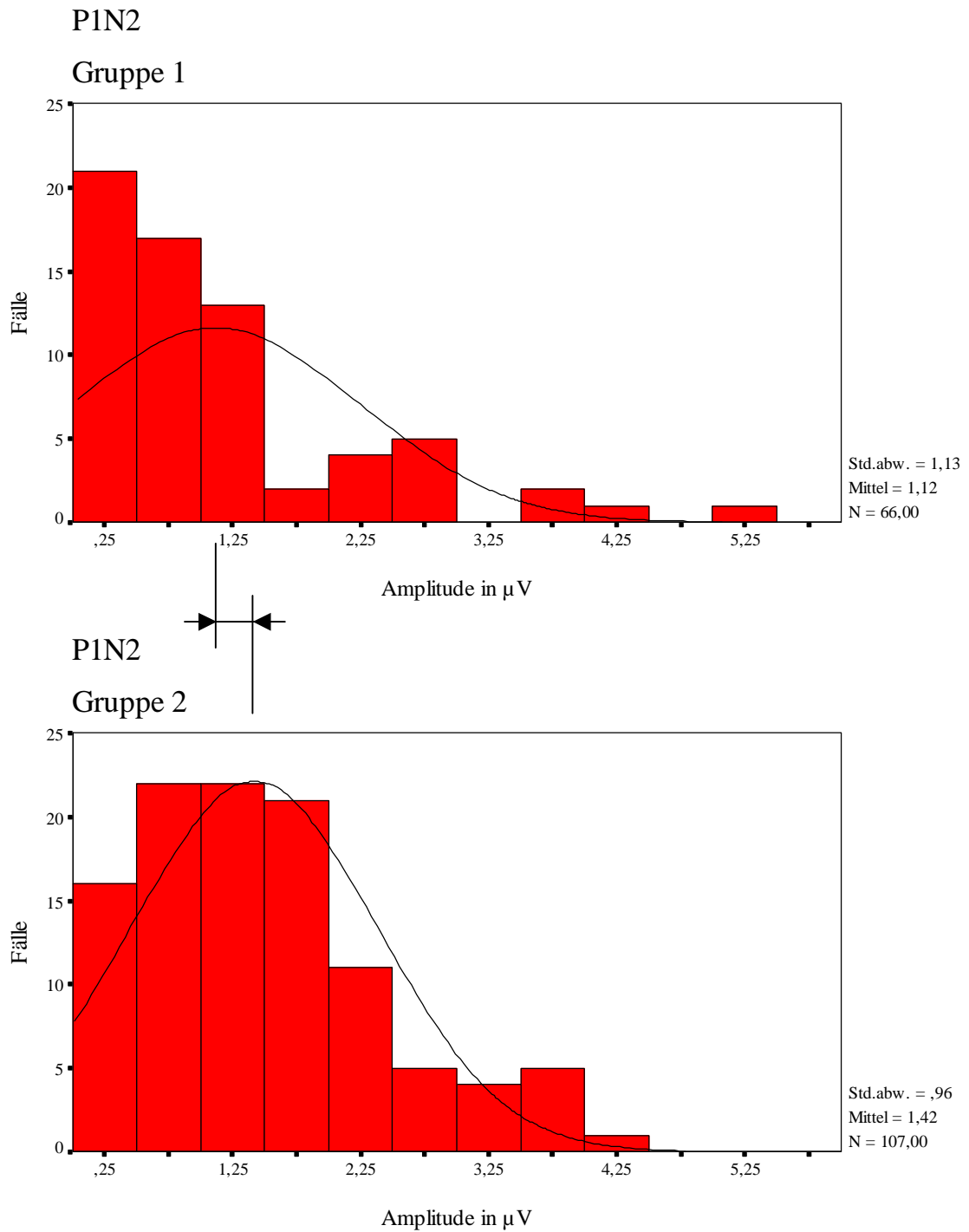


Abb. 10+11: Verteilung der Amplituden P1N2 (Absolutwerte) der Gruppen 1 und 2 im interindividuellen Vergleich. Die Differenz der Mittelwerte zwischen beiden Gruppen beträgt 0,3 μV (Pfeile). Die Verteilungskurve von Gruppe 1 ist in Richtung 0 μV verschoben.

N2P2

Der Mittelwert der Amplitude N2P2 (L5) liegt in Gruppe 1 bei 1,26 μV ($\text{SA}=1,14$) und in Gruppe 2 bei 1,61 μV ($\text{SA}=0,97$). Die Mittelwertdifferenz beträgt 0,35 μV . Es findet sich auch hier der größere Mittelwert in Gruppe 2 [Abb. 13+14]. Der Gipfel der Verteilungskurve von Gruppe 1 zeigt wie bei P1N2 eine Linksverschiebung um die Mittelwertdifferenz von 0,35 μV . 74 % der Amplituden von Gruppe 1 liegen im Bereich zwischen 0 und <1,5 μV . Wie bei P1N2 sind auch hier die Amplituden in Gruppe 2 breiter gestreut. 50% der Amplituden liegen in diesem Bereich. Die größte gemessene Amplitude N2P2 der Höhe L5 beträgt 4,6 μV in Gruppe 1 und 4,7 μV in Gruppe 2 [Tab.2]. Legt man die Grenze zwischen normal und pathologisch bei einer Amplitude <0,5 μV an, findet man eine Sensitivität von 23% und eine Spezifität von 92%. Das Verhältnis Sensitivität/Spezifität beträgt bei einem Grenzwert von 1 μV 50/74 %, bei 1,5 μV als Grenzwert 74/50 % und bei 2 μV 76/36 % [Abb.12].

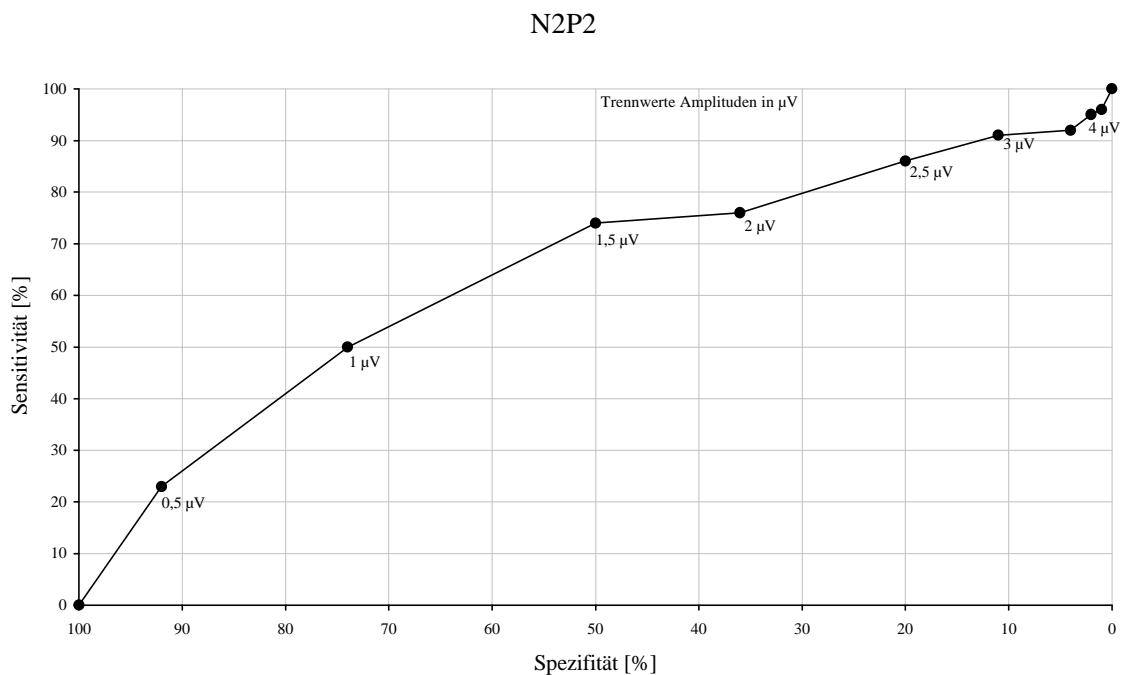


Abb. 12: Sensitivität und Spezifität der Amplituden N2P2 (Absolutwerte in μV) im interindividuellen Vergleich. Die Amplituden wurden in Gruppen zusammengefaßt. Der angegebene Trennwert stellt die Obergrenze des jeweiligen Bereichs dar, die in diesem nie erreicht wird.

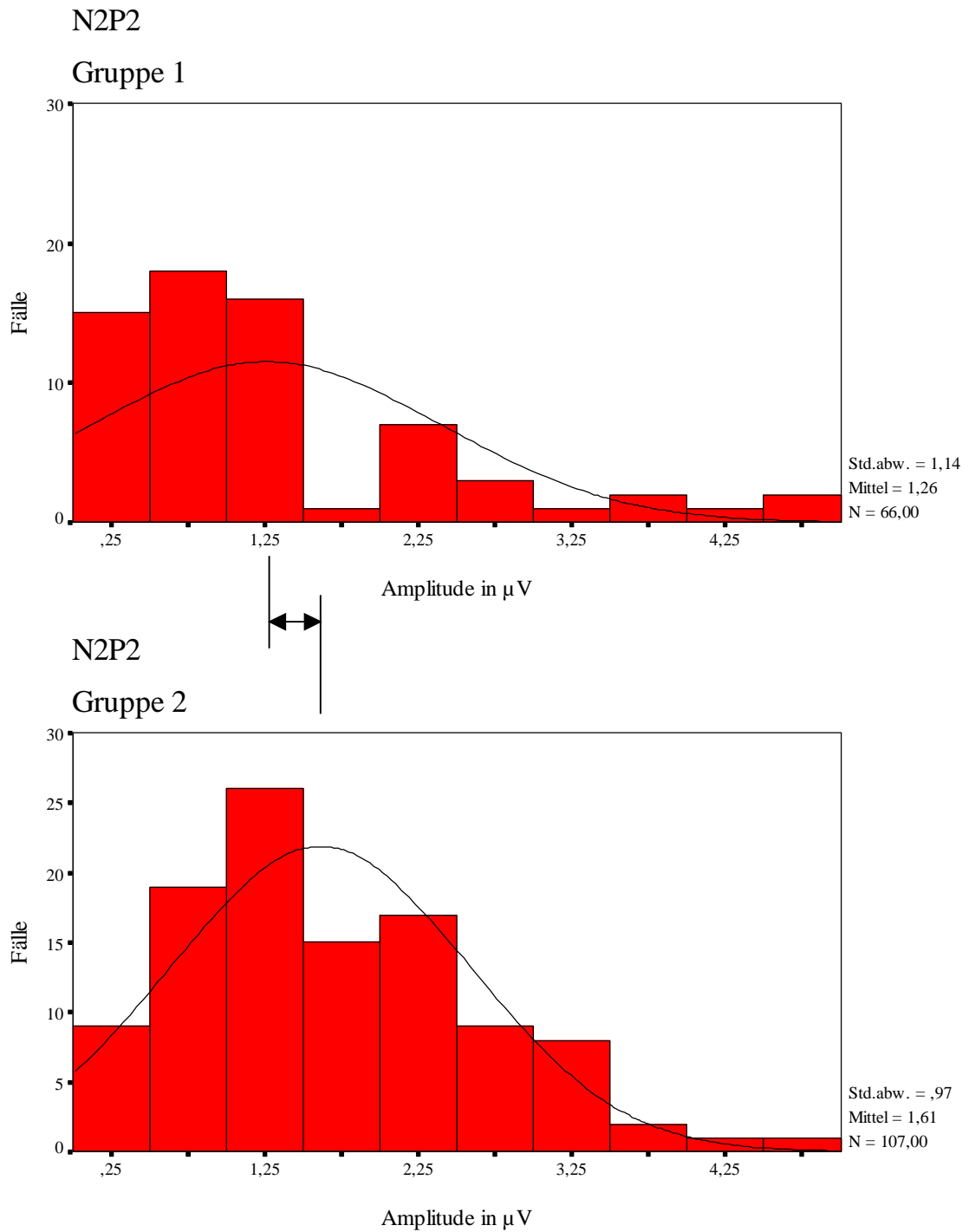


Abb. 13+14: Verteilung der Amplituden N2P2 (Absolutwerte) der Gruppen 1 und 2 im inter-individuellen Vergleich. Die Differenz der Mittelwerte zwischen beiden Gruppen beträgt hier $0,35 \mu V$ (Pfeile). Die Verteilungskurve von Gruppe 1 zeigt im Vergleich zur Verteilung der Amplituden von Gruppe 2 eine Linksverschiebung.

5.4. Intraindividueller Seitenvergleich

5.4.1. Latenzen

Im U-Test nach Mann und Whitney [23] ergaben sich hier keine signifikanten Lageunterschiede zwischen den Latenzen beider Gruppen. Die Ergebnisse des intraindividuellen Seitenvergleichs der Latenzen sind in den Tabellen 11-15 zusammengefaßt. Es treten wiederum Mittelwertverschiebungen zwischen Gruppe 1 und Gruppe 2 in beide Richtungen auf.

Latenzen Δ [ms]

	Derm.	Gruppe 1			Gruppe 2			P
		MW	SA	Fälle	MW	SA	Fälle	
N1	L4	1,88	1,40	5	4,00	5,29	3	0,882
	L5	2,06	1,56	17	3,13	2,39	15	0,129
	S1	2,59	2,22	12	2,53	2,58	16	0,592

	Derm.	Gruppe 1			Gruppe 2			P
		MW	SA	Fälle	MW	SA	Fälle	
P1	L4	2,03	3,04	12	3,62	3,95	10	0,108
	L5	2,54	2,23	48	2,48	2,13	41	0,911
	S1	2,55	2,46	53	2,14	2,02	35	0,563

	Derm.	Gruppe 1			Gruppe 2			P
		MW	SA	Fälle	MW	SA	Fälle	
N2	L4	2,82	3,14	12	3,25	2,82	11	0,516
	L5	3,23	3,44	52	2,42	1,70	42	0,647
	S1	2,53	2,75	52	2,33	2,61	37	0,697

	Derm.	Gruppe 1			Gruppe 2			P
		MW	SA	Fälle	MW	SA	Fälle	
P2	L4	3,00	1,55	11	1,95	1,33	11	0,094
	L5	3,97	4,23	53	2,69	2,26	42	0,151
	S1	2,79	2,46	50	3,62	3,78	38	0,514

	Derm.	Gruppe 1			Gruppe 2			P
		MW	SA	Fälle	MW	SA	Fälle	
N3	L4	2,50	2,78	8	4,00	3,22	7	0,318
	L5	5,26	4,94	34	3,45	3,30	33	0,105
	S1	3,03	3,25	32	4,42	4,12	31	0,094

Tab. 11-15: Mittelwerte und Standardabweichungen der Wellen N1, P1, N2, P2 und N3 sowie Signifikanz (P) der Seitendifferenzen zwischen den Gruppen 1 und 2 in ms.

5.4.2. Amplituden

Die statistische Auswertung erfolgte unter Verwendung von Prozentwerten, wobei die jeweils größere Amplitude 100% entsprach. Signifikante Lageunterschiede waren innerhalb der Dermatom-SEP der Höhe L5 bei den Amplituden P1N2 ($P=0,024$) und N2P2 ($P=0,033$) nachweisbar. Weitere Signifikanzen fanden sich nicht. Die Fallzahlen in den gegeneinander getesteten Gruppen betrugen für die Amplituden P1N2 und N2P2 der Höhe L5 in Gruppe 1 $n=59$ und in Gruppe 2 $n=45$.

Die Ergebnisse sind in den Tabellen 16-18 dargestellt. Die Verteilungen der Differenzen (Prozentwerte) der Amplituden P1N2 und N2P2 der Nervenwurzeln L5 beider Gruppen sind in den Histogrammen von Abb. 16+17 (P1N2) und Abb. 19+20 (N2P2) dargestellt. Angaben zu Sensitivität und Spezifität lassen sich für die entsprechenden Trennwerte aus den ROC-Kurven [Abb.15+18] entnehmen.

Amplituden Δ [%]

	Derm.	Gruppe 1			Gruppe 2			P
		MW	SA	Fälle	MW	SA	Fälle	
N1P1	L4	48,80	44,38	15	31,26	44,97	11	0,298
	L5	22,35	35,58	59	32,18	40,30	45	0,152
	S1	37,43	45,10	55	23,50	32,55	40	0,394

	Derm.	Gruppe 1			Gruppe 2			P
		MW	SA	Fälle	MW	SA	Fälle	
P1N2	L4	54,11	28,68	15	44,56	29,14	11	0,567
	L5	42,45	32,57	59	28,45	26,22	45	0,024
	S1	29,52	22,95	55	36,55	27,40	40	0,235

	Derm.	Gruppe 1			Gruppe 2			P
		MW	SA	Fälle	MW	SA	Fälle	
N2P2	L4	65,46	28,35	15	41,06	19,45	11	0,057
	L5	41,21	29,18	59	28,67	21,62	45	0,033
	S1	32,76	27,22	55	30,41	22,43	40	0,943

Tab. 16-18: Mittelwerte und Standardabweichungen der Amplituden N1P1, P1N2, N2P2 sowie Signifikanz (P) der Seitendifferenzen zwischen den Gruppen 1 und 2 in Prozent ($P<0,05$ fettgedruckt).

Die beiden im intraindividuellen Seitenvergleich signifikanten Amplituden der Höhe L5 sind im Folgenden kurz beschrieben.

P1N2

Der mittlere Amplitudenunterschied der Amplitude P1N2 (L5) im intraindividuellen Seitenvergleich beträgt in Gruppe 1 42,4 % (SA=32,57), in Gruppe 2 28,4 % (SA=26,22). Die Differenz der Amplitudenunterschiede zwischen beiden Gruppen beträgt 14,0 %.

Beim Vergleich der Verteilungskurven (Häufigkeit des Auftretens bestimmter Amplitudendifferenzen) beider Gruppen fällt bei Gruppe 1 eine Verschiebung des Kurvengipfels in Richtung der größeren Amplitudendifferenzen auf.

Bewertet man eine Amplitudendifferenz von mehr als 50% im Seitenvergleich als pathologisch, so liegt die Sensitivität der Untersuchungsmethode bei 34%, die Spezifität bei 76%. Bei Seitendifferenzen >60% beträgt das Verhältnis Sensitivität/Spezifität 31/84 % und bei >70% Seitendifferenz 22/91 % [Abb.15].

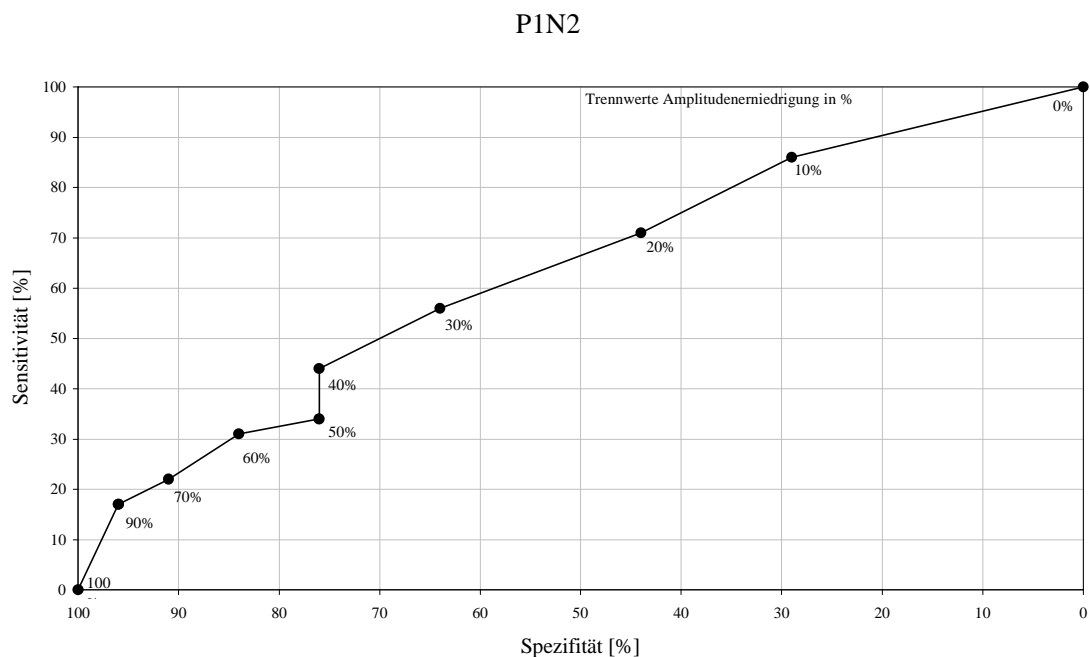


Abb. 15: Sensitivität und Spezifität der Amplitudenunterschiede P1N2 im intraindividuellen Seitenvergleich. Der angegebene Trennwert bezeichnet die jeweils angenommene Grenze zwischen normal und pathologisch.

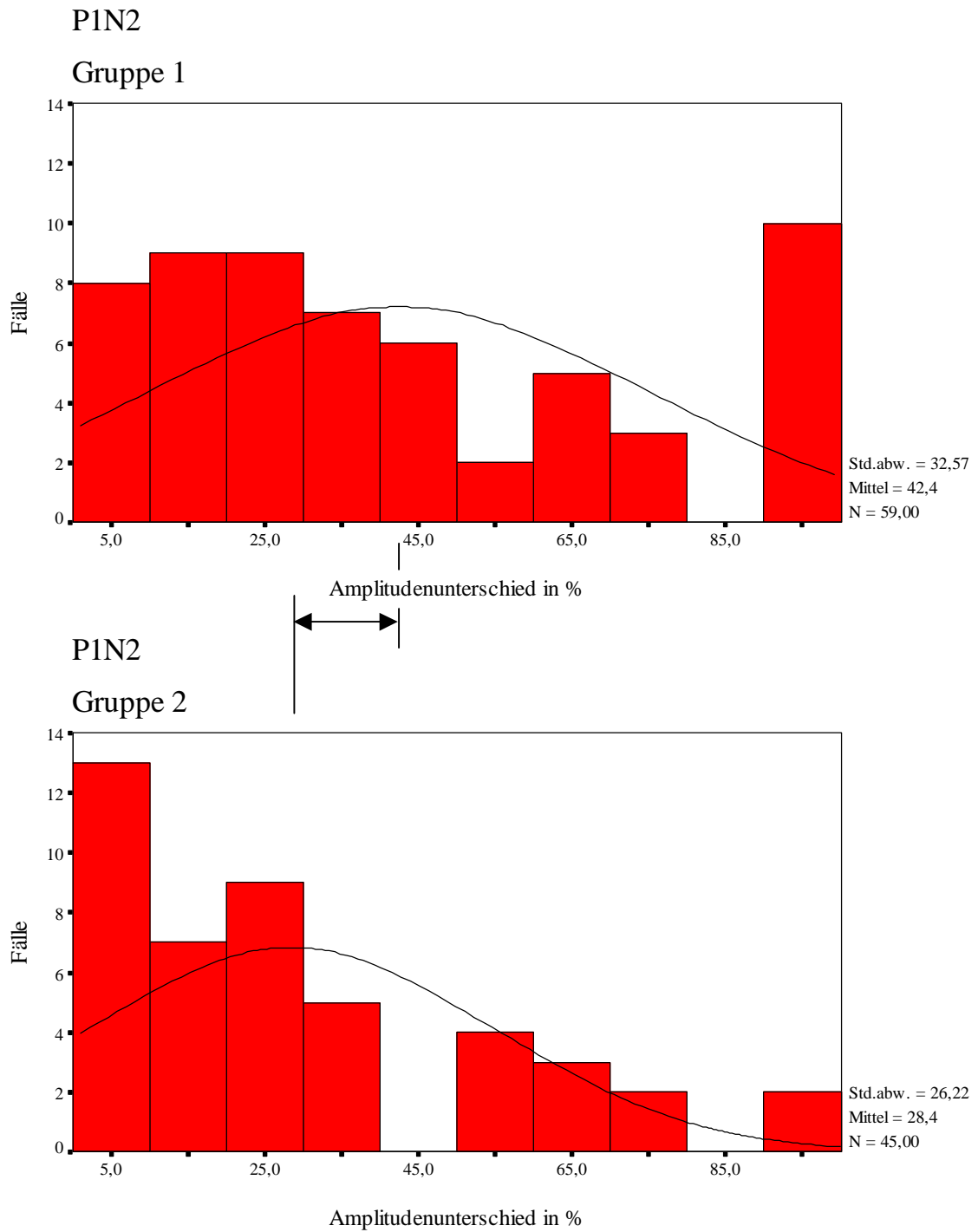


Abb. 16+17: Verteilung der Amplitudenunterschiede P1N2 der Gruppen 1 und 2 im intraindividuellen Seitenvergleich. Die Differenz der Mittelwertunterschiede zwischen beiden Gruppen beträgt 14% (Pfeile) zugunsten Gruppe 2. Die Verteilungskurve von Gruppe 1 ist in Richtung der größeren Amplitudendifferenzen verschoben.

N2P2

Der mittlere Amplitudenunterschied der Amplitude N2P2 (L5) im intraindividuellen Seitenvergleich beträgt in der Gruppe 1 41,2 % (SA=29,17) und 28,7 % in Gruppe 2 (SA=21,62). Die Differenz der Amplitudenunterschiede zwischen beiden Gruppen beträgt 12,5 %.

Beim Vergleich der Verteilungskurven fällt hier ebenfalls eine Gipfelverschiebung bei Gruppe 1 zugunsten der größeren Amplitudendifferenzen auf. Legt man die Grenze zwischen normal und pathologisch bei einer Amplitudendifferenz >50% an, so liegt die Sensitivität der Untersuchungsmethode bei 36%, die Spezifität bei 80%. Bei einem Grenzwert >60% beträgt das Verhältnis Sensitivität/Spezifität 24/87 %, >70% 15/98 % (Abb.18).

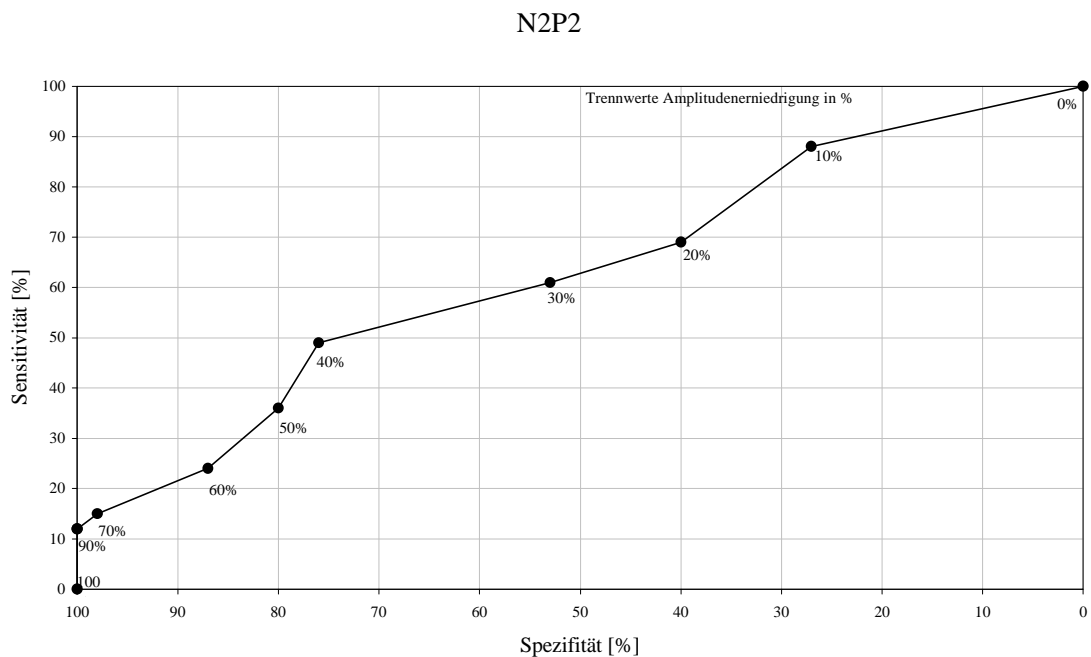


Abb. 18: Sensitivität und Spezifität der Amplitudenunterschiede N2P2 im intraindividuellen Seitenvergleich. Der angegebene Trennwert bezeichnet die jeweils angenommene Grenze zwischen normal und pathologisch.

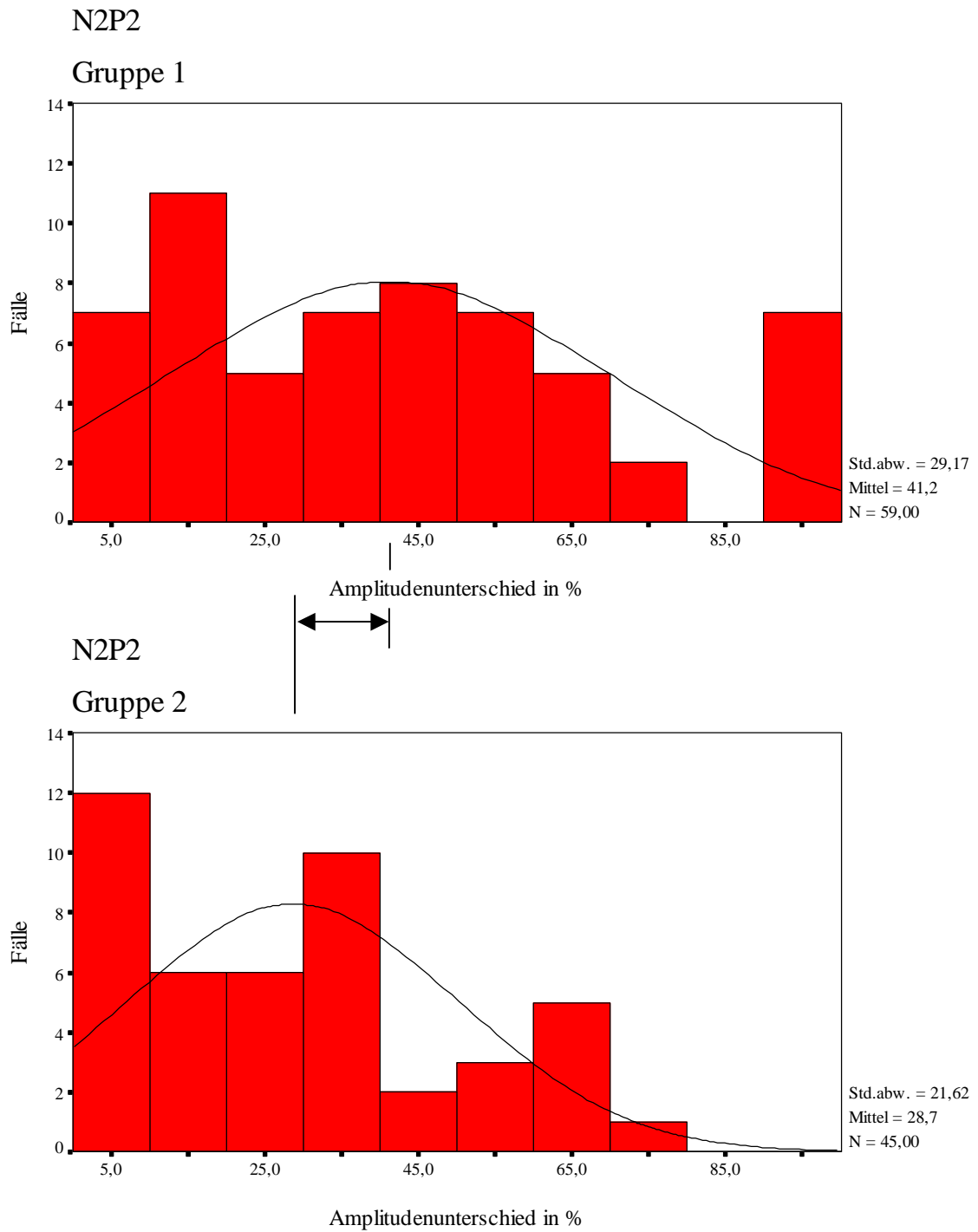


Abb. 19+20: Verteilung der Amplitudenunterschiede N2P2 der Gruppen 1 und 2 im intraindividuellen Seitenvergleich. Die Differenz der Mittelwertunterschiede zwischen beiden Gruppen beträgt 12,5% (Pfeile) zugunsten der Gruppe 2. Die Verteilungskurve von Gruppe 1 ist in Richtung der größeren Amplitudendifferenzen verschoben.

5.5. Intraindividueller Höhenvergleich

5.5.1. Latenzen

Im intraindividuellen Höhenvergleich konnten innerhalb der untersuchten Nervenwurzeln L4, L5 und S1 für die Latenzen N1, P1, N2, P2 und N3 im U-Test keine statistisch signifikanten Lageunterschiede zwischen den beiden Gruppen ermittelt werden. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 19-23 ersichtlich.

Latenzen Δ [ms]

N1	Derm.	Gruppe 1			Gruppe 2			p
		MW	SA	Fälle	MW	SA	Fälle	
	L5	3,18	2,74	13	1,81	1,22	12	0,252
	S1	2,72	1,87	21	2,72	1,87	13	1,000

P1	Derm.	Gruppe 1			Gruppe 2			p
		MW	SA	Fälle	MW	SA	Fälle	
	L5	3,14	2,75	30	2,01	1,53	29	0,213
	S1	2,27	2,08	36	2,43	1,93	33	0,828

N2	Derm.	Gruppe 1			Gruppe 2			p
		MW	SA	Fälle	MW	SA	Fälle	
	L5	2,97	2,71	31	2,12	1,40	30	0,431
	S1	1,98	1,43	36	2,24	2,28	33	0,938

P2	Derm.	Gruppe 1			Gruppe 2			p
		MW	SA	Fälle	MW	SA	Fälle	
	L5	3,54	2,88	34	2,57	2,68	30	0,102
	S1	2,96	4,13	35	2,96	3,18	32	1,000

N3	Derm.	Gruppe 1			Gruppe 2			p
		MW	SA	Fälle	MW	SA	Fälle	
	L5	3,74	3,22	25	3,32	3,16	23	0,732
	S1	3,06	2,44	31	3,31	2,00	26	0,747

Tab. 19-23: Mittelwerte und Standardabweichungen der Latenzen der Wellen N1, P1, N2, P2 und N3 sowie Signifikanz (P) der Seitendifferenzen zwischen den Gruppen 1 und 2 in μ V.

5.5.2. Amplituden

Im intraindividuellen Höhenvergleich konnten für die Amplituden N1P1, P1N2 und N2P2 der untersuchten Nervenwurzeln L5 und S1 keine statistisch signifikanten Lageunterschiede zwischen den beiden Gruppen ermittelt werden. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 24-26 dargestellt.

Amplituden Δ [%]

N ₁ P ₁	Derm.	Gruppe 1			Gruppe 2			p
		MW	SA	Fälle	MW	SA	Fälle	
	L5	0,76	0,06	34	0,72	0,07	30	0,640
	S1	0,40	0,07	37	0,28	0,07	33	0,295

P ₁ N ₂	Derm.	Gruppe 1			Gruppe 2			P
		MW	SA	Fälle	MW	SA	Fälle	
	L5	0,38	0,05	34	0,34	0,04	30	0,633
	S1	0,28	0,03	37	0,24	0,02	33	0,387

N ₂ P ₂	Derm.	Gruppe 1			Gruppe 2			P
		MW	SA	Fälle	MW	SA	Fälle	
	L5	0,37	0,05	34	0,34	0,05	30	0,824
	S1	0,29	0,03	37	0,29	0,04	33	0,981

Tab. 24-26: Mittelwerte und Standardabweichungen der Amplituden N1P1, P1N2 und N2P2 sowie Signifikanz (P) der Höhenunterschiede zwischen den Gruppen 1 und 2 in Prozent.

6. Diskussion

6.1. Die Rolle der Dermatom-SEP in der Praxis

Die Literatur weist eine Vielzahl verschiedenartiger Studien zur elektrophysiologischen Untersuchung mittels Dermatom-SEP bei lumbalen, aber auch bei zervikalen Wurzelkompressionssyndromen auf. Die Ergebnisse sind recht vielgestaltig und ein direkter Vergleich der Studien ist nur schwer möglich. So beschrieb Borrego et al. [1] bei 92% der untersuchten Patienten mit intraoperativ gesicherten radikulären Läsionen abnorme Dermatom-SEP-Befunde. Andere Untersucher wiederum zeigten, daß Dermatom-SEP nicht mit den mittels verschiedenster Methoden objektivierten pathologischen Befunden der Nervenwurzeln korrelieren und gegenüber anderen Untersuchungsmethoden keinen signifikanten Vorteil aufweisen [1, 2, 20, 47].

Aminoff et al. [4] und Slimp et al. [53] beschrieben eine positive Rolle von Dermatom-SEP bei Patienten mit Spinalstenose, bei isolierten Nervenwurzelläsionen jedoch eine zu niedrige Sensitivität. Scarff et al. [46] beschrieb 35 von 38 Fällen (92%) als korrekt diagnostiziert, Machida et al. [38] 33 von 40 (82%) und Katifi and Sedgwick [29] 17 von 19 Fällen (89%). Im Gegensatz dazu beschrieb Aminoff et al. [2] nur bei 7 von 28 Patienten (25%) ein pathologisches SEP. Tullberg et al. [58] fand bei 3 von 20 Patienten (15%) pathologische SEP-Befunde, welche übereinstimmend mit der CT die richtige Nervenwurzel anzeigten.

Die in der Praxis gewöhnlich zur Diagnostik einer neurologisch relevanten lumbalen radikulären Symptomatik verwendeten neuroradiologischen Untersuchungstechniken liefern meist eine klare Aussage und so erhobene positive Befunde sind als sichere Zeichen für einen Bandscheibenprolaps zu werten. Radiologische Darstellungstechniken zeigen aber nicht das Ausmaß einer Nervenwurzelläsion oder die Prognose für die Rückbildungsfähigkeit der neurologischen Symptome. Oftmals liefern sie nur ungenügend Informationen über die genaue Topologie der Wurzelkompression und in vielen Fällen stehen sie in Diskrepanz zur klinischen Manifestation der Beschwerden [52].

Neurophysiologische Untersuchungsmethoden lassen Aussagen zum funktionellen Zustand der untersuchten Strukturen des Zentralnervensystems (ZNS) zu. Sie stellen eine wichtige Zusatzuntersuchung zum klinischen Status und den üblicherweise verwendeten radiologischen Untersuchungstechniken dar. Dermatome-SEP können in solchen unklaren Fällen zur funktionellen Untersuchung spinaler Nervenwurzeln hilfreich sein und die Objektivierung der klinischen und neuroradiologischen Befunde ermöglichen. Sie können helfen Stärke, Prognose und funktionelle Relevanz einer Läsion einzuschätzen [52]. Als nicht invasives Untersuchungsverfahren sind Dermatome-SEP jederzeit und ohne langwierige Vorbereitung des Patienten durchführbar und werden von diesem meist gut toleriert.

Einige Autoren [47, 52] sprechen der SEP-Untersuchung den Stellenwert zu, um subklinische Veränderungen aufdecken zu können. Diese Veränderungen im Sinne einer frühen vaskulären Kompression oder Spinalstenose könnten für das Auftreten pathologischer Dermatome-SEP ohne Vorhandensein einer adäquaten Klinik ursächlich sein. In der Literatur werden immer wieder positive SEP-Befunde beschrieben, die im Gegensatz zur Klinik oder zur neuroradiologischen Testung stehen. Eine klare Definition von Abnormalitätskriterien einer SEP-Ableitung fehlt bislang. Es besteht auch hier ausgesprochene Uneinigkeit. Während einige Untersucher Amplitudengröße bzw. -differenz oder die Wellenkonfiguration als Abnormalitätskriterien benutzen [14, 48, 55], meinen andere, daß diese nicht als Zeichen für Abnormalität zu werten sind [18]. Meist werden Amplituden- bzw. Latenzdifferenzen von mehr als 2 bis 3 Standardabweichungen vom Normalwert als Grenze zwischen normal und pathologisch angesehen und auch hier existieren deutliche Diskrepanzen zwischen den einzelnen Untersuchern [1, 2, 3, 28, 29, 35].

6.2. Zur Methode

6.2.1. Einschlußkriterien

Im untersuchten Patientenkollektiv kommen sowohl monoradikuläre als auch polyradikuläre Läsionen vor. Polyradikuläre Läsionen können unilateral-multisegmental, bilateral-monosegmental oder bilateral-multisegmental auftreten. In einigen Studien wurden ausschließlich Patienten mit streng einseitigen oder sogar streng monoradikulären Läsionen elektrophysiologisch untersucht. Die Streubreite der Ergebnisse ist erheblich. Tullberg et al. [58] leitete bei 20 Patienten prä- und postoperativ Dermatome-SEP ab. Alle Patienten hatten in der CT nachgewiesene unilaterale Bandscheibenvorfälle von jeweils nur einer Höhenlokalisation und die entsprechende Klinik der Wurzelkompression. Bei 8 Patienten waren pathologische SEP-Befunde zu verzeichnen, von denen lediglich 3 mit der in der CT ermittelten Schädigungslokalisation übereinstimmten. 5 der pathologischen Befunde wiesen auf andere Nervenwurzeln hin. Das Ergebnis entspricht einer Sensitivität von 15 %. Snowden et al. [55] fand bei Patienten mit Spinalkanalstenose oder Läsionen mehrerer Nervenwurzeln eine Sensitivität von 78%, bei isolierten Läsionen einer Nervenwurzel 93%. Sitzoglou et al. [52] untersuchte 24 Patienten mit streng einseitiger Pathologie von einer oder zwei Nervenwurzeln mit typischer Klinik sowie Funktionseinschränkungen. Patienten mit bilateralen Symptomen wurden ausgeschlossen. In 20 von 24 Fällen (83%) konnte die Nervenwurzelläsion durch Dermatome-SEP korrekt lokalisiert werden. In 4 Fällen wurden normale SEP abgeleitet, das EMG zeigte bei diesen 4 Patienten ebenfalls keinen Hinweis für eine Radikulopathie. Die Dermatome-SEP von 12 Patienten zeigten eine Latenzverzögerung, die übrigen überhaupt keine Reizantwort.

Einen entscheidenden Einfluß auf das Ergebnis der hier vorgestellten Studie könnte das Alter der Patienten haben. Es handelt sich um eine praxisrelevante klinische Studie und eine Altersgrenze wurde als Einschlußkriterium nicht festgelegt. Der jüngste der 115 Probanden war 19 Jahre, der älteste 79 Jahre alt (MW 43,9 J). Es ist bekannt, daß degenerative Veränderungen mit zunehmendem Alter häufiger auftreten und somit das Risiko der Beeinflussung durch vaskuläre

oder osteophytäre Komponenten sowie andere pathologische Veränderungen steigt. Sitzoglou et al. [52] untersuchte bewußt 24 relativ junge Patienten im Alter zwischen 24 und 42 Jahren (MW 33,4 J), um dieses Risiko möglichst gering zu halten.

Nach Auswertung der Literatur könnte die Sensitivität der Methode bei strenger gefaßten Einschlußkriterien höher ausfallen. Um zu demonstrieren, daß Dermatom-SEP fähig sind die geschädigte Nervenwurzel in den meisten Fällen korrekt anzuzeigen, sollten ausschließlich Patienten mit unilateraler und unisegmentaler Radikulopathie untersucht werden, wobei die SEP-Befunde der anderen Höhen und der asymptomatischen Gegenseite normal sein sollten [20].

6.2.2. Reiz und Ableittechnik

Evozierte Potentiale entsprechen der elektrischen Aktivität neuronaler Strukturen des ZNS, angestoßen durch einen äußeren Reiz [36]. Voraussetzungen für die Ableitung sind also ein von außen einwirkender Reiz, der hier in Form von elektrischen Einzelimpulsen gesetzt wurde, intakte Strukturen des ZNS sowie korrekt über dem primären somatosensorischen Kortex platzierte Ableitelektroden. Dabei kommen entweder Nadelelektroden oder Oberflächenelektroden zum Einsatz zwischen deren Ableitungen nachweislich keine signifikanten Amplituden- und Latenzunterschiede existieren [13, 51, 59]. In der Literatur sind bei Ableitung von Medianus-SEP- unter Verwendung von Nadelelektroden durch Muskelartefakte bedingte stärkere Potentialstörungen als bei Oberflächenelektroden beschrieben [9].

Die Besonderheit bei Dermatom-SEP besteht darin, daß die Reizelektroden nicht über einem bestimmten Nerv, sondern vielmehr über einem Dermatom angebracht werden [1, 4, 28, 34, 35, 45, 46, 48]. Diese als Stimulationsort genutzten Dermatomte sind Hautgebiete, bei denen nach entsprechender Reizung die Amplitude einer einzelnen Nervenwurzel um ein Vielfaches größer ist als die der benachbarten Nervenwurzel. Die Stimulation dieser Gebiete wird deshalb oft gleichgesetzt mit der Stimulation einer einzelnen Nervenwurzel [34] und auf dieser Grundlage basiert auch diese Studie. Zur genauen Positionierung der Reizelektroden finden sich in der Literatur verschiedene, teilweise sehr variierende

Angaben [17, 27, 29, 49]. Die meisten Untersucher stimmen jedoch darin überein die Elektrode für die sensible Wurzel L4 im Bereich anteromedial distal der Patella, für L5 am Fuß dorsal proximal des Interdigitalraumes zwischen 1. und 2. Zeh und für S1 dorsal proximal und etwas lateral des 5. Zehs zu platzieren [20, 34, 54, 56] und entsprechend wurden auch in dieser Studie die Positionen der Reizelektroden gewählt. Theoretisch sollte jedes spezifische Dermatome von jeweils nur einer Nervenwurzel innerviert werden. Unglücklicherweise werden diese Dermatome aber nur selten von einem einzelnen Spinalnerven versorgt, ohne daß es zu Überlappungen mit benachbarten Dermatomen kommt [16, 34]. Sitzoglou et al. [52] beschrieb die Möglichkeit von Dermatomüberlappungen durch Querverbindungen der Nervenfasern von 2 oder 3 Wurzeln. Um mit der beschriebenen Untersuchungstechnik verwertbare Ergebnisse zu erhalten, sollte die Gefahr von Dermatomüberlappungen auf ein Minimum reduziert werden. Es ist deshalb wichtig, die Reizelektroden sehr sorgfältig und standardisiert so zu platzieren, daß eine maximale dermatomspezifische Stimulation erreicht wird [20]. Aufgrund der äußerst kleinen Amplituden spinaler Dermatome-SEP werden in der Regel nur die vom Skalp ableitbaren evozierten Potentiale zur Beurteilung verwendet. Skalp-SEP lassen sich vielfach bereits nach einer Mittelung von 250 Reizantworten auswerten. Die Beurteilung kann aber auch bei Mittelung einer großen Anzahl von Reizantworten schwierig sein [37, 54]. Um die Güte des erhaltenen Signals beurteilen zu können, muß der Mittelungsvorgang mindestens einmal wiederholt werden. Eine andere Möglichkeit besteht darin, Signale nach geradzahligen und ungeradzahligen Reizen getrennt in 2 Speichern zu errechnen und diese dann zu vergleichen [37]; dieses Verfahren wurde hier angewendet. Trotzdem waren zwischen 306 und 1000 Mittelungsschritte erforderlich, um Potentialableitungen von guter Qualität zu erhalten.

Katifi and Sedgwick [28] beschrieben eine maximale Reizantwort bei Skalpableitung unter Verwendung einer Reizfrequenz von 3,1 Hz und Reizintensitäten, die dem Zwei- bis dreifachen der sensiblen Schwelle entsprachen. Bei niedrigeren Reizintensitäten oder höheren Frequenzen kann die Reizantwort abgeschwächt werden. Vom Patienten werden Reize mit einer Intensität des Zwei- bis dreifachen der sensiblen Schwelle aber nicht immer toleriert. Die hier eingesetzten Intensitäten wurden vom Patienten nach seinem individuellen Schmerzempfinden

selbst definiert [58]. In beiden Gruppen wurde mit exakt der gleichen Reizstärke stimuliert.

6.2.3. Andere Faktoren

Slimp et al [54] wies auf den Einfluß des Wachheitsgrades auf die SEP-Antwort hin. Weiterhin beschrieb er atypische Wellenformen und in einem Fall eine Lateralitätsasymmetrie, so daß die maximale Reizantwort nach Stimulation der linken Seite ipsilateral und die der rechten Seite kontralateral zu verzeichnen war. Vergleiche der vom Scalp abgeleiteten Reizantworten von Dermatom-SEP der Höhen L5 und S1 und Tibialis-SEP zeigten eine um 25% höhere Variabilität der Dermatom-SEP. Ein Faktor dafür ist der Wachheitsgrad der Probanden. Schlaf kann die Amplituden der Dermatom-SEP vermindern [54]. Dieser Unsicherheitsfaktor sollte während der Untersuchung minimiert werden. An dieser Stelle sei bemerkt, daß die Wellenkonfiguration nicht als Abnormalitätskriterium benutzt werden sollte, worin die meisten Untersucher auch übereinstimmen [20]. Beim wachen und unzureichend entspannten Patienten kann die einstreuende Muskelaktivität einen weiteren Störfaktor darstellen. Das Untersuchungsverfahren ist dem Patienten meist unbekannt, so daß er angespannt und ängstlich erwartet, was auf ihn zukommt [31]. Deshalb wurden alle Probanden nach erfolgter ausführlicher Information über die bevorstehende Untersuchung gebeten, sich während der SEP-Ableitung möglichst gut zu entspannen, die Augen aber offen zu halten.

6.2.4. Statistische Überlegungen

Statistische Berechnungen und Testverfahren erfordern meist eine Mindestzahl an Fällen um sicher verwertbar zu sein. Erst die hohe Zahl der untersuchten Patienten bzw. Nervenwurzeln machte eine korrekte statistische Auswertung dieser Arbeit möglich. Dabei ging es weniger darum, die pathologische Nervenwurzel sicher aufzuspüren, als vielmehr zu klären, ob überhaupt statistisch signifikante Unterschiede zwischen SEP-Ableitungen normaler und pathologischer Nervenwurzeln existieren. Die Wurzeln mit den zugehörigen Dermatom-SEP

wurden deshalb in 2 Gruppen eingeteilt und hinsichtlich signifikanter Lageunterschiede zwischen den beiden Gruppen getestet. Anhand der Literaturauswertung muß festgestellt werden, daß bisher kein präoperativ mittels Dermatom-SEP untersuchtes Patientenkollektiv vergleichbarer Größe unter Zuhilfenahme eines einheitlichen Referenzkriteriums statistisch untersucht wurde.

6.2.5. Referenzkriterien

Tullberg et al. [58] bemerkte, daß intraoperativ erhobene Befunde als objektives Referenzkriterium zur Befundobjektivierung von SEP-Untersuchungen nicht geeignet seien, da dabei einerseits aufgrund der subjektiven Sichtweise des Operateurs die Gleichheit nicht gewährleistet wäre und andererseits gewöhnlich nur eine oder zwei Nervenwurzeln beschrieben würden. Hier drängt sich die Frage auf, welche Kriterien eine Methode erfüllen muß, um als objektiv zu gelten. Bei den gewöhnlich zur Befundobjektivierung verwendeten radiologischen Untersuchungsmethoden werden meist mehrere Bandscheibenetagen dargestellt. Eine eindeutige Aussage zum Vorliegen einer Wurzelkompressionen kann aber auch hier nicht getroffen werden. Viele subklinische Bandscheibenprotrusionen sind Zufallsbefunde und bleiben für den Patienten oft ohne weitere Konsequenzen. Alle in diese Studie eingeschlossenen Patienten wurden präoperativ mittels CT, MRT oder Myelographie sowie klinisch untersucht und die Lokalisation der Wurzelkompression konnte so gesichert werden. Der zusätzlich im OP erhobene Befund ist als objektives Referenzkriterium für die SEP-Untersuchung zu werten. Auch von anderen Autoren werden intraoperativ erhobene Befunde zur Befundobjektivierung der SEP-Untersuchungen benutzt [29, 30, 32].

6.3. Zu den Ergebnissen

6.3.1. Interindividueller Vergleich

Eine interindividuelle Auswertung der Latenzen lumbaler Dermatom-SEP-Ableitungen ist nicht sinnvoll. Das Fehlen signifikanter Unterschiede zwischen beiden Gruppen belegt diese Aussage. Aufgrund der großen Streubreite der Absolutwerte der Latenzen sind die für das untersuchte Kollektiv innerhalb der Gruppe 2 ermittelten Normalwerte nicht als objektives interindividuelles Vergleichskriterium zu werten. Die Hauptursache dafür ist am ehesten im Studiendesign (Einschlußkriterien) zu suchen. Signifikante Amplitundenunterschiede konnten für P1N2 und N2P2 der Höhe L5 ermittelt werden. Die Amplituden weisen ebenfalls eine erhebliche interindividuelle Streuung auf und sind daher im Einzelfall äußerst kritisch zu bewerten.

Slimp et al. [54] untersuchte 41 gesunde Probanden zwischen 20 und 58 Jahren mit Dermatom-SEP. Die beschriebenen Mittelwerte der Amplituden und Latenzen der Ableitungen L4 bis S1 stimmen nicht mit den in dieser Studie für das Vergleichskollektiv ermittelten Werten überein. Die Stimulationsorte entsprechen den hier verwendeten.

In der Literatur ist eine klare Abhängigkeit der Latenzen der Dermatom-SEP von L4, L5 und S1 von der Größe bzw. der Beinlänge des Patienten beschrieben. Eine Abhängigkeit von der Länge der Wirbelsäule besteht nicht [1, 14, 28, 38, 40]. Diese Tatsache könnte das Fehlen signifikanter Latenzunterschiede im interindividuellen Vergleich erklären, da die Körpergröße bzw. Beinlänge in keinem der 3 Vergleiche berücksichtigt wurde. Die Möglichkeit von Dermatomüberlappungen durch Nervenfaserkollateralen ist in der Literatur ebenfalls beschrieben [52], wodurch Meßwertverfälschungen der abgegriffenen Potentiale resultieren können.

Weiterhin könnten SEP-Veränderungen aus früheren, dem Patienten nicht immer erinnerlichen Läsionen benachbarter Nervenwurzeln fortbestehen, was vor allem dann problematisch wird, wenn eine solche Wurzel fälschlicherweise der Vergleichsgruppe zugeordnet wird. An dieser Stelle sei bemerkt, daß es trotz allem außerordentlich wichtig für jeden Untersucher ist, SEP-Befunde gesunder

Nervenwurzeln mit der von ihm verwendeten Methode innerhalb des Patientenkollektivs zu ermitteln und sein eigenes Normalkollektiv zusammenzustellen, da die Ergebnisse anderer Studien nicht ohne Weiteres auf die eigene übertragen werden können.

6.3.2. Intraindividueller Seitenvergleich

Die Untersuchungsmethode erbrachte signifikante Gruppenunterschiede für die Amplituden P1N2 und N2P2 der Höhe L5. Die Auswertung der Latenzen ist für die Beurteilung von Dermatome-SEP im Seitenvergleich aufgrund der fehlenden statistischen Signifikanz nicht geeignet. Die SEP-Ableitungen der Höhen L4 und S1 wiesen keine statistisch signifikanten Latenz- oder Amplitudenunterschiede auf und sind somit ebenfalls für die Untersuchung nicht geeignet. Ob die Reihenfolge der SEP-Ableitungen dabei eine Rolle spielt ist nicht bekannt, allerdings muß die Möglichkeit eines Amplitudengefälles während der Untersuchung in Betracht gezogen werden. Auch paradox erhöhte Potentiale können nicht ausgeschlossen werden, wofür die Literatur allerdings keine sicheren Hinweise bietet.

Die meisten SEP-Studien wurden lediglich hinsichtlich der Übereinstimmung der SEP-Ableitung mit dem erhobenen pathologischen Befund ausgewertet. Die Forderung der Statistik nach Gewährleistung der Gleichheit der Untersuchungsobjekte ist aber aufgrund der existierenden physiologischen Latenz- und Amplitudenunterschiede der verschiedenen untersuchten Höhen damit nicht hinreichend erfüllt. Deshalb erfolgte die Auswertung in dieser Arbeit getrennt für jede einzelne Höhe L4, L5 und S1.

Eine vom Skalp abgeleitete normale Dermatome-SEP-Antwort läßt auf eine intakte Verbindung zwischen dem stimulierten Dermatome und dem entsprechenden spinalen Segment und weiter über die somatosensorischen Nervenfasern zum Gehirn schließen [54]. Die evozierten Potentiale dienen der Überprüfung der Funktion des jeweils aktivierten Bahnsystems. Dabei erlaubt ein abnormer Befund der evozierten Potentiale keinesfalls die Aussage, daß auch die klinische Funktion gestört sein muß. Eine Krankheitsdiagnose läßt sich daraus ebenfalls nicht ableiten, wohl aber ist eine Funktions- und Lokalisationsaussage möglich [36]. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, wo die Grenze (Trennwert) zwischen

normal und pathologisch zu ziehen ist. Mit der in dieser Arbeit gewählten Darstellung von Sensitivität und Spezifität in Form von ROC-Kurven soll versucht werden diese Frage zu beantworten. Sensitivität und Spezifität einer Methode zeigen eine strenge Abhängigkeit von der Position des Trennwertes, welche vom jeweiligen Untersucher meist willkürlich festgelegt wird. Verschiebt man den Trennwert zwischen normal und pathologisch im intraindividuellen Seitenvergleich in Richtung 100% Amplitudenunterschied, so sinkt die Sensitivität und steigt die Spezifität der Untersuchungsmethode. Bei einer Trennwertverschiebung in Richtung 0% Amplitudenunterschied ist das Gegenteil der Fall.

Die meisten Untersucher sehen den Patienten als Untersuchungsobjekt und nicht die einzelne Nervenwurzel. Eine Gesamtbetrachtung aller intraindividuell abgeleiteten Potentiale erscheint außerordentlich sinnvoll und könnte helfen, die Lokalisation der Wurzelkompression aufzuspüren. Aufgrund der enormen interindividuellen Variabilität der Amplituden und Latenzen kann es von Vorteil sein, wenn jeder Patient eigene intraindividuelle Kontrollwerte liefert. So ist eine Auswertung auch dann möglich, wenn keine verwertbaren Normalwerte vorliegen. Eisen et al. [18] sowie Pilade et al. [39] wiesen auf die Wichtigkeit der Amplitudenmessung sowohl als Absolutwert als auch im Seitenvergleich bei zervikalen SEP-Ableitungen hin. In der Literatur sind hier Amplitudenunterschiede im Seitenvergleich zervikaler SEP von bis zu 40% bei gesunden Probanden beschrieben [37]. Auch cerebrale interhemispherielle Assymetrien können für deutliche Potentialunterschiede im intraindividuellen Seitenvergleich innerhalb des Normalkollektivs ursächlich sein. Tullberg et al. [58] fand im intraindividuellen Seitenvergleich Amplitudendifferenzen von 50% und mehr in allen untersuchten Etagen L4 bis S1, wobei im untersuchten Patientenkollektiv ausschließlich monoradikuläre Läsionen bei im CT nachgewiesenem Bandscheibenvorfall und typischer Klinik vorlagen. Gleiches wird auch bei gesunden Probanden beschrieben.

6.3.3. Intraindividueller Höhenvergleich

Im intraindividuellen Höhenvergleich werden Latenzen und Amplituden miteinander verglichen, die sich physiologischerweise bereits in ihren Normalwerten unterscheiden. Somit ist ein direkter statistischer Vergleich nicht durchführbar. Dennoch ist ein intraindividueller Höhenvergleich möglich, wenn die gemessenen Werte für die Amplituden und Latenzen entsprechend interpoliert werden und so mit denen der anderen Höhe direkt vergleichbar sind. Slimp et al. [54] wies in einer Studie mit 41 gesunden Probanden statistisch signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Höhenlokalisationen nach. Um eine statistische Vergleichbarkeit herzustellen, wurden die Werte der verschiedenen Höhen intraindividuell gemittelt. In dieser Arbeit wurden dafür die innerhalb des Normalkollektivs im interindividuellen Vergleich ermittelten durchschnittlichen Amplituden- und Latenzunterschiede benutzt. Dazu mußte jeder gemessene Wert in beiden Gruppen um die errechnete mittlere physiologische Differenz der jeweiligen Wellenkomponente korrigiert werden. An dieser Stelle sei nochmals die Wichtigkeit eines Normalkollektivs, welches jeder Untersucher zusammenstellen sollte, betont.

Der intraindividuelle Höhenvergleich zeigt in dieser Studie weder für die Amplituden noch für die Latenzen eine statistische Signifikanz und ist somit zur Topodiagnostik sensibler radikulärer Ausfälle nicht geeignet. Ursächlich kommt hier die bereits beschriebene Möglichkeit von Dermatomüberlappungen [52] infrage. Die resultierenden Überlagerungseffekte sind am ehesten ipsilateral zu erwarten und lassen eine objektive Auswertung nicht zu.

7. Zusammenfassung

115 Patienten wurden elektrophysiologisch mittels Dermatom-SEP untersucht. Es wurden insgesamt von 498 Nervenwurzeln der Höhen L4, L5 und S1 SEP abgeleitet und entsprechend der intraoperativ erhobenen Befunde in eine pathologische und eine normale Gruppe eingeteilt. Die Latenzen und Amplituden der SEP-Ableitungen wurden im interindividuellen Vergleich sowie im intraindividuellen Seiten- und Höhenvergleich hinsichtlich statistisch signifikanter Lageunterschiede zwischen beiden Gruppen getestet.

Für die Amplituden P1N2 und N2P2 der Höhe L5 konnten im interindividuellen Vergleich und im intraindividuellen Seitenvergleich signifikante Gruppenunterschiede ermittelt werden. Alle anderen untersuchten Amplituden wiesen keine Signifikanzen auf. Die Auswertung von Latenzen ist zur Objektivierung sensibler radikulärer Ausfälle bei lumbalen Bandscheibenvorfällen aufgrund der ebenfalls fehlenden statistischen Signifikanzen nicht geeignet. Weiterhin ungeeignet ist die Auswertung sowohl der Amplituden als auch der Latenzen im intraindividuellen Höhenvergleich.

Die zum Thema der elektrophysiologischen Untersuchung sensibler radikulärer Ausfälle vorliegende Literatur wurde ausgewertet. Eine Vielzahl der durchgeführten Studien liefert viele verschiedene und teilweise widersprüchliche Ergebnisse. Die Verschiedenartigkeit der angewandten Untersuchungsmethoden läßt eine direkte Vergleichbarkeit nur schwer zu.

Die alleinige Ableitung von Dermatom-SEP bei Patienten mit sensiblen radikulären Ausfällen bei lumbalen Bandscheibenvorfällen stellt kein objektives Untersuchungsverfahren dar und ist deshalb wenig sinnvoll. Die exakte Lokalisation einer komprimierten Nervenwurzel durch isolierte Untersuchung mittels Dermatom-SEP ist in Anbetracht der für die signifikanten Wellen ermittelten Sensitivität und Spezifität nicht möglich.

Im Rahmen der Topodiagnostik lumbaler radikulärer Kompressionssyndrome ist die Ableitung und Auswertung von Dermatom-SEP aber eine durchaus sinnvolle und nützliche Zusatzuntersuchung, die dem Untersucher eine Aussage über den funktionellen Zustand des untersuchten Reizleitungssystems liefert, besonders dann, wenn klinisch rein sensible Ausfälle vorliegen, welche im EMG nicht

darstellbar sind. Dies könnte auch bei radiologisch erfaßten Bandscheibenvorfällen in mehreren Höhen oder wenn die Klinik des Patienten nicht mit den Ergebnissen radiologischer Untersuchungsmethoden übereinstimmt der Fall sein.

8. Literaturverzeichnis

1. Aminoff MJ, Goodin DS, Barbaro NM, Weinstein PR, Rosenblum ML. Dermatomal somatosensory evoked potentials in unilateral lumbosacral radiculopathy. *Annals of neurology* 1985;17:171-182
2. Aminoff MJ, Goodin DS, Parry GJ, Barbaro NM, Weinstein PR, Rosenblum ML. Electrophysiologic evaluation of lumbosacral radiculopathies: electromyographie, late responses, and somatosensory evoked potentials. *Neurology* 1985;35:1514-1518
3. Aminoff MJ, Goodin DS. Dermatomal somatosensory evoked potentials in lumbosacral root compression. *Journal of neurology, neurosurgery, and psychiatry* 1988;51:740-742.
4. Aminoff MJ. Segmentally specific somatosensory evoked potentials. *Neurol Clin* 1991;9:663-669
5. Besser R, Hopf HCh. Grundlagen des elektrophysiologischen Monitoring. In Brandt L. *Cerebrales Monitoring in der Anästhesie*. Bibliomed. Melsungen 1988;61-76
6. Borrego CJ, Trujillo JM, Ospina OL, Midina MP. Dermatomal somatosensory evoked potentials normative study and usefulness for the evaluation of radicular injury. *J Electrophysiol Technology* 1987;13:63-80
7. Cassvan A, Park YS. Cortical somatosensory evoked potentials following peroneal nerve stimulation in lumbosacral radiculopathies. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 1983;23:393-402
8. Chabot RJ, Donald GD, Glastein CD, Merkin H, Hession EF. The diagnostic utility of dermatomal evoked potentials. *Journal of spinal disorders* 1995;4:296-303.
9. Dal-Bianco P, Mamoli B, Dorda W. Somatosensorisch evozierte Potentiale (SSEP): Normwerte und methodische Probleme bei verschiedenen Ableitungstechniken. *Wiener Klinische Wochenschrift* 1983;95:470-474.
10. Davidoff RA. The dorsal columns. *Neurology* 1989;39:1377-1385
11. Dawson GD. Cerebral responses to electrical stimulation of peripheral nerve in man. *J Neurol Neurosurg Psychiat* 1947a;10:137-140
12. Dumitru D, Dreyfuss P. Dermatomal/segmental somatosensory evoked potential evaluation of L5/S1 unilateral/unilevel radiculopathies. *Muscle Nerve* 1996;442-449

-
13. Dumitru D, Lester JP. Needle and surface electrode somatosensory evoked potential normative data: a comparison. *Arch Phys Med Rehabil* 1991;72:989-992.
 14. Dumitru D, Newton BY, Dreyfuss P. Segmental V dermatomal somatosensory-evoked potentials. Normal intertrial variation and side-to-side comparison. *Am J Phys Med Rehabil* 1993;72:75-83.
 15. Dvonch V, Scarff T, Bunch WH, Smith D, Boscardin J, Lebarge H, Ibrahim K. Dermatomal somatosensory evoked potentials: their use in lumbar radikulopathy. *Spine* 1984;9:291-293
 16. Dykes RW, Terzis JK. Spinal nerve distributions in the upper limb: the organization of the dermatome and afferent myotome. *Phil Trans R Soc Lond* 1981;B293:509
 17. Eisen A, Elleker G. Sensory nerve stimulation and evoked cerebral potentials. *Neurology* 1980;30:1097-1105
 18. Eisen A, Hoirsch M, Moll A. Evaluation of radiculopathies by segmental stimulation and somatosensory evoked potentials. *Can J Neurol Sci* 1983;10:178-182
 19. Feinsod M, Blau D, Findler G, Hadani M, Beller AJ. Somatosensory evoked potential to peroneal nerve stimulation in patients with herniated lumbar discs. *Neurosurgery* 1982;11:506-511
 20. Ferguson JH, Brin M, Goldstein ML, Gorelich PB, Hanley DF, Lange DJ, Nuwer MR, Roach ES, Goldman R, Goodin D, Marini AM. Assessment: Dermatomal somatosensory evoked potentials. Report of the American Academy of Neurology's Therapeutics and Technology Assessments Subcommittee. *Neurology* 1997;49:1127-1130.
 21. Flax HJ, Berrios R, Rivera D. Electromyography in the diagnosis of herniated lumbar disc. *Arch Phys Med Rehabil* 1964;45:520-524
 22. Green J, Gildemeister R, Hazelwood C. Dermatally stimulated somatosensory cerebral evoked potentials in the clinical diagnosis of lumbar disc disease. *Clinical Electroencephalography* 1983;14:152-160
 23. Guggenmoos-Holzmänn I, Wernicke KD. *Medizinische Statistik*. Blackwell Berlin 1996;96-99
 24. Guggenmoos-Holzmänn I, Wernicke KD. *Medizinische Statistik*. Blackwell Berlin 1996;150-154
 25. Hoover BB, Caldwell JW, Krusen EM, Mackelroy RN. Value of polyphasic potentials in diagnosis of lumbar root lesions. *Arch Phys Med Rehabil* 1970;51:546-548

-
26. Jones SJ, Small DG. Spinal and subcortical evoked potentials following stimulation of the posterior tibial nerve in man *Electroenceph Clin Neurophysiol* 1978;44:299-306
 27. Jörg J. *Praktische SEP-Diagnostik*. Enke Stuttgart 1983
 28. Katifi HA, Sedwick EM. Somatosensory evoked potentials from posterior tibial nerve and lumbosacral dermatomes. *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 1986;65:249-259.
 29. Katifi HA, Sedgwick EM. Evaluation of the dermatomal somatosensory evoked potentials in the diagnosis of lumbo-sacral root compression. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatrie* 1987;50:1204-1210
 30. Knutsson B. Comparative value of electromyographic, myelographic and clinical-neurological examinations in diagnosis of lumbar root compression syndrome. *Acta Orthop Scand Suppl* 1961;49:1-135
 31. Kröger G. Was erleben Kranke bei technischen Untersuchungen im Krankenhaus?. *EEG-EMG* 1989;1:105-118
 32. Lajoie WJ. Nerve root compression: Correlation of electromyographic, myelographic and surgical findings. *Arch Phys Med Rehab* 1972;53:390-392
 33. Lane ME, Tamhankar MN, Demopoulos JT. Discogenic radiculopathy: Use of electromyography in multidisciplinary management. *NY State J Med* 1978;78:32-36
 34. Liquori R, Krarup C, Trojaborg W. Determination of the segmental sensory and motor innervation of the lumbosacral spinal nerves: an electrophysiological study. *Brain* 1992;115:915-934
 35. Liguori R, Taher G, Trojaborg W. Somatosensory evoked potentials from cervical and lumbosacral dermatomes. *Acta Neurologica Scandinavica* 1991;84:161-166.
 36. Lowitzsch K, Maurer K, Hopf HCh, Tackmann W, Claus D. *Evozierte Potentiale bei Erwachsenen und Kindern*. Georg Thieme Stuttgart 1993;1-13
 37. Lowitzsch K, Maurer K, Hopf HCh, Tackmann W, Claus D. *Evozierte Potentiale bei Erwachsenen und Kindern*. Georg Thieme Stuttgart 1993;213-264
 38. Machida M, Asai T, Sato K, Toriyama S, Yamada T. New approach for diagnosis in herniated lumbosacral disc. Dermalomal somatosensory evoked potentials (DSSEPs). *Spine* 1986;11:380-384

-
39. Pilade JP, Pelissier J, Georgescu M, Simon L. Spinal somesthetic evoked potentials and cervicobrachial neuralgia. *Rev Rhum* 1984; 51:7-13
 40. Pop PHM, Oepkes CT, Notermans SLH, Viek NMT, Stegeman DF. Dermatomal somatosensory evoked potentials of the lumbar and cervical roots. *Eur Arch Psychiat Neurol Sci* 1988;238:22-27
 41. Rappelsberger P. Verstärkung von EEG-Signalen. *EEG-Lab* 1980;2:87-103
 42. Rappelsberger P. Analog-Digital-Konversion des EEG: Voraussetzung für die Computerverarbeitung. *EEG-Lab* 1984;6:27-39
 43. Rappelsberger P. Mittelung evozierter Potentiale. *EEG-Lab* 1985;7:53-62
 44. Rappelsberger R. Messung von Elektrodenwiderständen. *EEG-Lab* 1982;4:25-31
 45. Rodriquez AA1, Kanis L, Rodriquez AA, Lane D. Somatosensory evoked potentials from dermatomal stimulation as an indicator of L5 and S1 radiculopathy. *Archives of physical medicine and rehabilitation* 1987; 68:366-368.
 46. Scarff TB, Dallmann DE, Toleikis JR, Bunch WH. Dermatomal somatosensory evoked potentials in the diagnosis of lumbar root entrapments. *Surg Forum* 1981;32:489-491
 47. Schmid UD, Hess WC, Ludin HP. Somatosensory evoked Potentials following nerve and segmental stimulation do not confirm cervical radiculopathy with sensory deficit. *J Neurol Neurosurg Psychiat* 1988;51:182-187
 48. Sedgwick EM, Katifi HA. How to record and interpret dermatomal somatosensory evoked potentials (DSEP). *J Electrophysiol Technology* 1987;13:51-60
 49. Seyal M, Sandhu LS, Mack YP. Spinal segmental somatosensory evoked potentials in lumbosacral radiculopathies. *Neurology* 1989;39:801-805
 50. Shea PA, Woods WW, Werden DH. Electromyography in diagnosis of nerve root compression syndrome. *Arch Neurol Psychiatr* 1950;64:93-104
 51. Siivola J, Järvilheto M. Spinal evoked potentials evaluated with two relevant electrode types. *Acta physiol scand* 1982;115:103-107
 52. Sitzoglou K, Fotiou F, Tsiptsios I, Tsonidis C, Fountoulakis K, Papakostopoulos D, Tsitsopoulos P. Dermatomal SEPs - a complementary study in evaluating patients with lumbosacral disc prolapse. *Int-J-Psychophysiol* 1997;25:221-226.

53. Slimp JD, Robinson LR, Kraft GH, et al. Somatosensory evoked potentials in cord and root diseases. *Western J Med* 1990;153:433
54. Slimp JC, Rubner DE, Snowden ML, Stolov WC. Dermatomal somatosensory evoked potentials: cervical, thoracic, and lumbosacral levels. *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 1992;84:55-70.
55. Snowden ML, Haselkorn JK, Kraft GH, Slimp JC, Stolov WC. Dermatomal somatosensory evoked potentials in the diagnosis of lumbosacral spinal stenosis: comparison with imaging studies. *Muscle & nerve* 1992;15:1036-1044.
56. Tokuhashi Y, Satoh K, Satoru F. A Quantitative Evaluation of Sensory Dysfunction in Lumbosacral Radiculopathy. *Spine* 1991;16:1321-1328.
57. Tsitsopoulos PH, Fotiou F, Papakostopoulos D, Sitzoglou K, Tavridis G. Comparative study of clinical and surgical findings and somatosensory evoked potentials in patients with lumbar spinalstenosis and disc protrusion. *Acta Neurochirurgica* 1987;84:54-63
58. Tullberg T, Svanborg E, Isaccsson J, Grane P. A preoperative and postoperative study of the accuracy and value of electrodiagnosis in patients with lumbosacral disc herniation. *Spine* 1993;18:837-842
59. Vogel P. Subkortikale und kortikale sensibel evozierte Potentiale: Grenzen des Normalen, diagnostischer Wert bei ausgewählten Erkrankungen des peripheren und zentralen Nervensystems. *Habil Bonn* 1985
60. Willis WD, Coggeshall RE. Sensory mechanism of the spinal cord. *Wiley & Sons Chichester* 1978
61. Wise CS, Ardizzone K. Electromyography in intervertebral disc protrusion. *Arch Phys Med Rehabil* 1954;35:442-446
62. Yamada T, Machida M, Kimura J. Far-field somatosensory evoked potentials after stimulation of the tibial nerve. *Neurology (NY)* 1982;32:1151-1158

Danksagung

Mein Dank gilt vor allem Herrn Prof. Dr. med. R. Kalff für das freundliche Überlassen des Themas und die fortwährende Unterstützung.

Ganz besonders möchte ich mich bei Herrn Dr. med. A. Hochstetter für die fruchtbare Zusammenarbeit sowie die zahlreichen Anregungen bei der klinischen Tätigkeit und der Fertigstellung der Arbeit bedanken.

Besonderer Dank gilt Frau Dr. H. Hoyer für die hilfreiche Beratung zur statistischen Auswertung.